www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

12e JAARGANG No. 12, blz. 341-372 DECEMBER 1950

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

SPECTROCHEMISCHE ANALYSE

door N. W. H. ADDINK en W. de GROOT.

545.828:537.52

In een groot bedrijf komt het geregeld voor dat chemische analysen moeten worden uitgevoerd, zowel voor de keuring van de voor de fabricage nodige grondstoffen als voor contrôle tijdens het fabricageproces en als hulpmiddel bij het wetenschappelijk onderzoek. Naast de gewone chemische analyse wordt hierbij gebruik gemaakt van de spectroscopie, waarbij de te onderzoeken stof in een vlam, vonk of koolboog tot lichten wordt gebracht. In dit artikel wordt een spectrochemische analysemethode beschreven die gebruik maakt van de koolboog.

Inleiding

Indien een element in gasvorm op een hoge temperatuur wordt gebracht of blootgesteld wordt aan een electrische ontlading, zendt het licht uit, dat bestaat uit een aantal stralingen van zeer bepaalde, voor het element karakteristieke frequenties. Onderzoekt men het licht met een spectroscoop of spectrograaf, dan neemt men een aantal scherpe lijnen (spectraallijnen) waar, die tezamen het spectrum van het element vormen.

De studie van deze spectra is van groot belang geweest voor de natuurkunde, omdat zij leidde tot een dieper inzicht in de bouw der atomen. Maar ook de chemie heeft van deze studie geprofiteerd, omdat men in het spectrum een gevoelig hulpmiddel bezit om atoomsoorten te herkennen.

Terwijl het daarbij aanvankelijk ging om een qualitatieve bepaling, dus om de aanwezigheid van een bepaald element vast te stellen, is het begrijpelijk dat men in een later stadium getracht heeft de spectroscopie ook dienstbaar te maken aan de quantitatieve analyse.

Kirchhoff en Bunsen, die omstreeks 1860 het eerst op de belangrijkheid van de spectroscopie voor de chemie hebben gewezen, brachten de elementen tot lichten door een kleine hoeveelheid van een verbinding, bijv. een zout of oxyde, in een kleurloze gasvlam (bunsenbrander) te verdampen. Bij de quantitatieve analyse gebruikt men thans, naast vlammen, veelal electrische ontladingen, namelijk de vonk of de boog.

In dit artikel zal een methode van quantitatieve spectrochemische analyse worden besproken die gebruik maakt van een koolboog, die met gelijkstroom wordt gevoed. Een afgewogen hoeveelheid (enkele mg) van het te onderzoeken monster wordt in de positieve krater volledig tot verdampen gebracht en het spectrum van het tijdens de verdamping uitgezonden licht wordt gefotografeerd. Uit de zwarting die de diverse spectraallijnen op de fotografische plaat veroorzaken, laten zich dan de concentraties van de bestanddelen van het monster afleiden. Deze methode van onderzoek is uitgewerkt tot een routinemethode, die niet alleen in nauwkeurigheid met de gewone chemische analyse kan wedijveren, maar bovendien deze daarbij in snelheid overtreft.

Alvorens deze methode te beschrijven, lijkt het ons dienstig iets nader in te gaan op de wijzen waarop een spectrum kan ontstaan.

Het ontstaan van een spectrum

Het energieschema

De voor een element karakteristieke frequenties kan men onderbrengen in een zg. termschema of energieschema. Als voorbeeld zijn in *fig. 1* de energieschema's van het kwikatoom en van het neonatoom afgebeeld. De horizontale lijnen stellen de energiewaarden (energieniveaus) voor, die behoren bij een aantal stationnaire toestanden (aangeslagen toestanden) van de betrokken atoomsoort.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hierbij zijn, om de figuur niet te onoverzichtelijk te maken, de hogere energieniveaus weggelaten. Deze hogere niveaus convergeren naar een bepaalde grens, de zg. ionisatie-energie, overeenkomende met de energie die vereist is om het electron dat zich in de diverse aangeslagen toestanden in verschillende „banen" beweegt uit de toestand met kleinste energie geheel buiten het atoomverband te brengen.

De verticale lijnen beduiden „overgangen" tussen de energieniveaus. In navolging van Bohr (1913) stelt men zich voor dat bij de overgang van een toestand met energie E_1 naar een toestand met energie E_2 ($<E_1$) een lichtquantum wordt uitgezonden, met de frequentie ν, waarbij

$$h\nu = E_1 - E_2 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin stelt h de constante van Planck voor. Omgekeerd kan een atoom dat zich in de toestand met energie E_2 bevindt, door absorptie van een lichtquantum van dezelfde frequentie ν in de toestand E_1 overgaan. De energieën E_1 en E_2 worden meestal gerekend van af het grondniveau, dat overeenkomt met de normale, niet aangeslagen, toestand van het atoom.

Stelt men $E = eU$, waarbij e ($= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ coulomb) de lading van het electron voorstelt en U, in volts uitgedrukt, het potentiaalverschil dat een aanvankelijk rustend electron zou moeten doorlopen, om een (kinetische) energie E te verkrijgen, dan bestaat, in verband met de waarden van h ($= 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ W sec^2) en c (lichtsnelheid $= 2{,}998 \cdot 10^8$ m/sec) tussen het potentiaalverschil $\Delta U = U_1 - U_2$ en de golflengte $\lambda = c/\nu$ van de betrokken spectraallijn het verband:

$$\lambda \cdot \Delta U = 12395 \text{ Å} \cdot \text{V} .$$

Overeenkomstig de interpretatie van het energieschema moet men, om een atoom straling met een bepaalde golflengte te doen uitstralen, aan het atoom energie toevoeren gelijk aan de energiewaarde E_1 van het beginniveau. Behalve dat E_2 tezamen met E_1 volgens (1) de frequentie bepaalt, speelt de waarde van E_2, de energie van het eindniveau, hierbij geen rol. De juistheid van deze opvatting is op fraaie wijze bevestigd door de proeven van Franck en Hertz[1]).

[1]) Zie bijv. Handb. d. Physik (Geiger und Scheel) Bd. 23, I. 23-184, Springer, Berlin 1933.

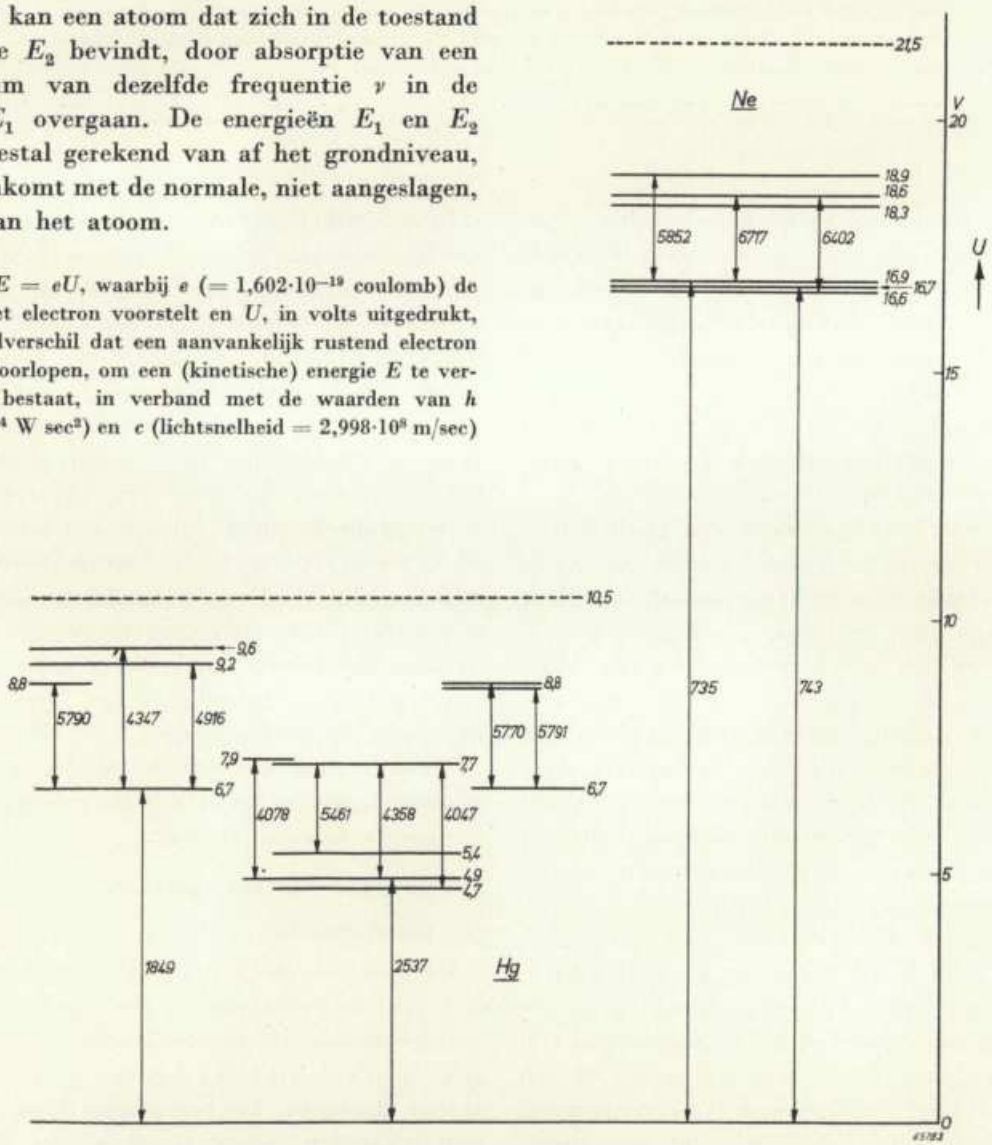


Fig. 1. Termschema (onvolledig) van kwik (Hg) en neon (Ne) met enkele overgangen. Bij de overgangen zijn de golflengten in Å aangegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 2 geeft hiervan een voorbeeld. Electronen van constante snelheid v, verkregen door deze electronen een potentiaalverschil U te laten doorlopen, zodat

$$\tfrac{1}{2} m v^2 = e U ,$$

worden in een ruimte geschoten welke neon van 0,5 mm druk en een weinig kwikdamp bevat.

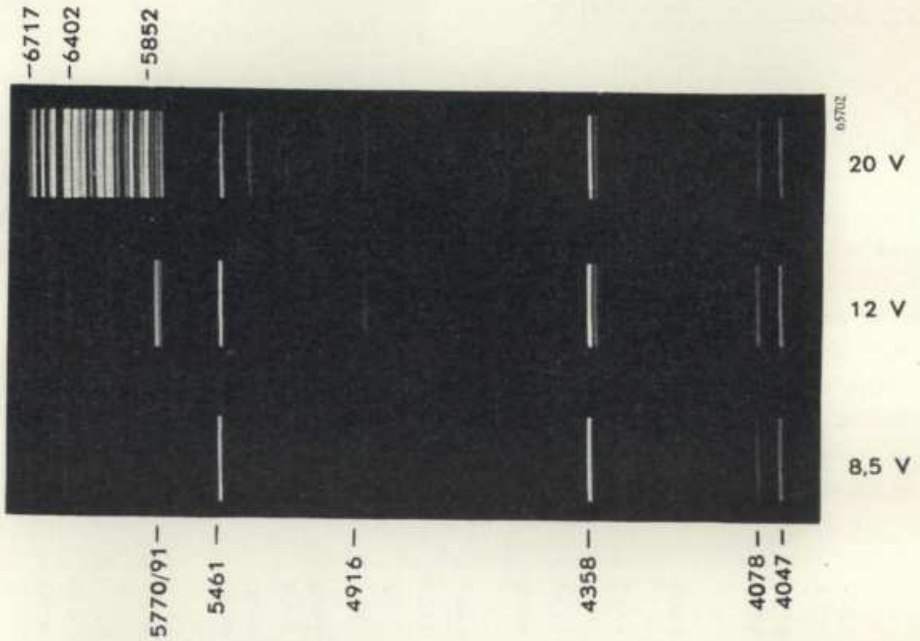


Fig. 2. Spectrum van een mengsel van kwik en neon bij beschieting met electronen, versneld door een spanning van respectievelijk 8,5 V, 12 V en 20 V. — De zwakke lijnen ter linkerzijde in de spectra voor 12 V en 8,5 V zijn neonlijnen, afkomstig van strooilicht uit een deel van de proefbuis waarin snellere electronen aanwezig zijn.

Een atoom kan in een toestand met energie E_1 gebracht worden indien

$$eU \geqq E_1 . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

In overeenstemming met het schema van fig. 1 verschijnen, bij toenemende U, eerst de kwiklijnen in volgorde van hun beginniveaus en vervolgens de rode neonlijnen.

Deze methode om een spectrum te verkrijgen, met behulp van electronen met constante snelheid, is van grote waarde bij het onderzoek van de „structuur" van een spectrum. Voor de chemische analyse is zij minder geschikt.

Ovenspectra

Men kan een spectrum ook verkrijgen door een element in gas- of dampvorm te brengen in een alzijdig gesloten ruimte waarvan de wanden op een constante temperatuur T zijn gebracht. De thermodynamica leert dat in dit geval de toestand geheel door de waarde van T wordt bepaald en dat het aantal atomen van een bepaalde atoomsoort, dat zich in een toestand met energie E bevindt, gegeven is door

$$\frac{n_E}{n_0} = \frac{g_E}{g_0} e^{-E/kT} . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Hierin stelt n_E het aantal atomen in de aangeslagen toestand en n_0 het aantal atomen in de grondtoestand voor; de g's zijn voor de betrokken toestanden en voor het element karakteristieke gewichtsfactoren, die in de meeste gevallen weinig van 1 verschillen.

Kinetisch gezien komt deze evenwichtstoestand tot stand door een aantal paren van elkaar tegenwerkende atomaire processen [2]), namelijk:

1) absorptie en emissie van straling,
2) vorming en vernietiging van aangeslagen atomen door botsing met electronen,
3) idem door botsing met andere aanwezige atomen of moleculen.

Maakt men in twee tegenover elkaar liggende wanden van de afgesloten ruimte een kleine opening, zodat men door het binnenste heen kan kijken, of maakt men, zoals door King [3]) is gedaan (zie

[2]) Opmerkelijk is, dat het hierbij zo is gelegen dat, volgens het principe van het gedetailleerd evenwicht, ieder paar antagonistische processen op zichzelf het evenwicht tot stand zou kunnen brengen. Zie bijv. M. J. Druyvesteyn en W. de Groot, Physica **12**, 153-166, 1932.

[3]) A. S. King, Phil. Trans. Roy. Soc. Londen **A 208**, 111, 1908.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

fig. 3), gebruik van een oven in de vorm van een aan beide zijden open buis waarvan de wand op een constante hoge temperatuur is gebracht, en brengt men daarin een stof, bijv. ijzer, tot verdampen, dan ziet men het spectrum van de stof

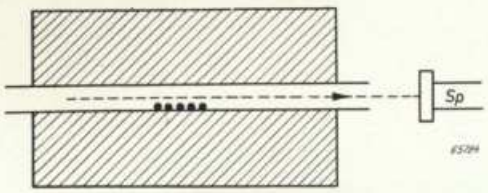


Fig. 3. Oven van King. *Sp* = spectrograaf.

verschijnen. De intensiteit van iedere spectraallijn is evenredig met de betrokken n_E. Indien men de temperatuur verhoogt, zullen de atomen met hogere aanslagenergie in aantal toenemen. Bij lage temperatuur ziet men alleen de lijnen die van niveaus met lage aanslagenergie uitgaan. *Fig. 4* geeft hiervan een voorbeeld.

Ten einde te voorspellen hoe verschillende elementen zich in dit opzicht naast elkaar zullen gedragen, kan men met succes gebruik maken van een tabel van ionisatiespanningen. Immers, de ionisatieenergie $E_i = eU_i$ is, als bovenste grens, een ruwe maat voor de aanslagenergie. Zulk een tabel is hieronder afgedrukt (*tabel I*) en in *fig. 5* grafisch weergegeven. Zoals men ziet, ligt de ionisatiespanning U_i van de meeste elementen tussen 6 en 10 volt. Een ionisatiespanning lager dan 6 volt vindt men bij de alkali-metalen en verder bij enkele elementen zoals Sr, Ba, La, Hf, Ra en U, dus in hoofdzaak in de linker benedenhoek van de tabel. Een ionisatiespanning hoger dan 10 V treft men aan bij de edelgassen, de halogenen en de elementen O, S, N, P, As, C en Hg, dus in hoofdzaak in de rechter bovenhoek. Met uitzondering van de genoemde elementen zullen de meeste atoomsoorten dus bij ongeveer dezelfde temperatuur zichtbaar worden. Een temperatuur van 2000 à 3000 °K is hiervoor voldoende.

De vlam

In plaats van de elementen in dampvorm in een oven te verhitten, kan men ze ook in een, zelf niet-lichtgevende, vlam aan een hoge temperatuur blootstellen om het spectrum te bekijken. In de vlam zullen de boven besproken processen eveneens werkzaam zijn; daarbij zijn de processenparen (2) en (3) volledig werkzaam, niet echter het processenpaar (1), omdat er wel uitstraling is maar geen instraling plaats vindt. Men kan echter aantonen dat dit het evenwicht als geheel slechts weinig stoort, zodat de intensiteiten ongeveer op dezelfde wijze als in het geval van de oven van de temperatuur afhangen. De temperatuur van de vlam van een gewone bunsenbrander is niet bijzonder hoog, ongeveer 1700 °C. Daarom is deze vlam dan ook slechts bruikbaar voor elementen die zich gemakkelijk laten verdampen en die een relatief lage ionisatiespanning hebben. In de spectrochemie maakt men tegenwoordig ook wel gebruik van speciale vlammen, die gevoed worden met een mengsel van gas en zuurstof en waarmee hogere temperaturen worden verkregen.

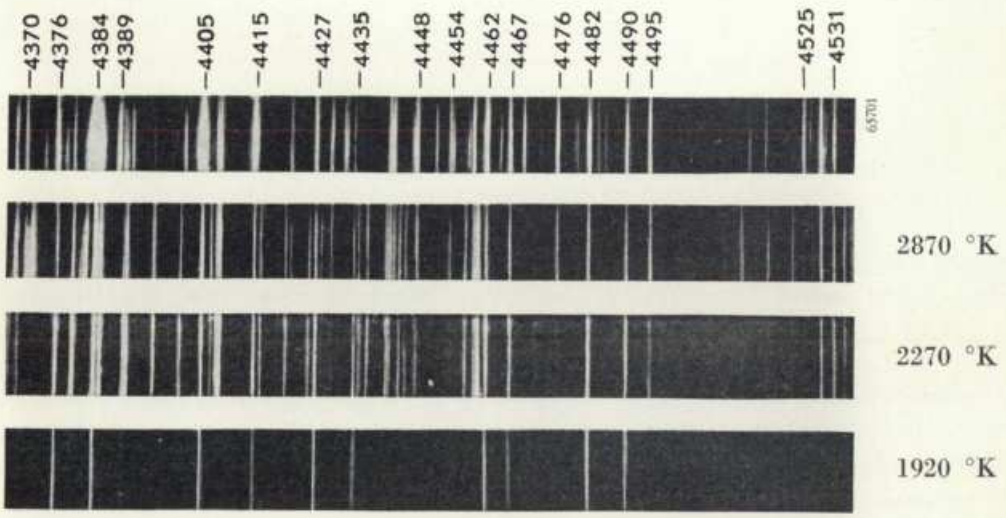


Fig. 4. Opname, volgens King, van het spectrum van ijzer bij drie temperaturen. Daarboven het boogspectrum van ijzer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Electrische ontladingen bij lage druk

Behalve door een gas of damp bloot te stellen aan een hoge temperatuur, kan men deze tot lichten brengen door een electrische ontlading, zoals hierboven, bij de vermelding van de proef van Franck en Hertz, al naar voren kwam.

Wij moeten hierbij onderscheid maken tussen ontladingen bij lage druk en geringe stroomdichtheid (geisslerbuis) en die bij hoge druk en grote stroomdichtheid (boog en vonk).

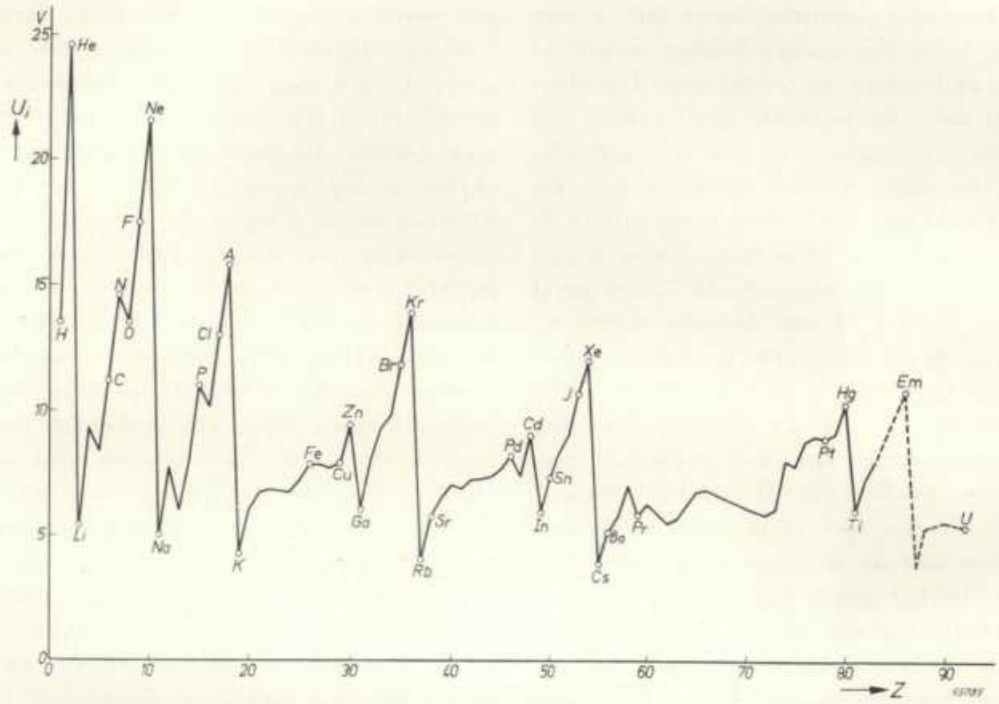


Fig. 5. De ionisatiespanning U_i van de elementen, uitgezet als functie van hun atoomnummer Z.

Tabel I. De chemische elementen, gerangschikt volgens het periodieke systeem. Boven elk element is het atoomnummer vermeld, er onder de ionisatiespanning in volts.

1 H 13,6																2 He 24,6
3 Li 5,4	4 Be 9,3	5 B 8,3	6 C 11,3										7 N 14,5	8 O 13,6	9 F 17,4	10 Ne 21,6
11 Na 5,1	12 Mg 7,6	13 Al 6,0	14 Si 8,1										15 P 11,0	16 S 10,4	17 Cl 13,0	18 A 15,8
19 K 4,3	20 Ca 6,1	21 Sc 6,7	22 Ti 6,8	23 V 6,7	24 Cr 6,8	25 Mn 7,4	26 Fe 7,9	27 Co 7,9	28 Ni 7,6	29 Cu 7,7	30 Zn 9,4	31 Ga 6,0	32 Ge 8,1	33 As 10	34 Se 9,8	35 Br 11,8	36 Kr 14,0
37 Rb 4,2	38 Sr 5,7	39 Y 6,6	40 Zr 6,95	41 Nb 6,8	42 Mo 7,4	43 Tc	44 Ru 7,5	45 Rh 7,7	46 Pd 8,3	47 Ag 7,6	48 Cd 9,0	49 In 5,8	50 Sn 7,3	51 Sb 8,6	52 Te 9,0	53 J 10,4	54 X 12,1
55 Cs 3,9	56 Ba 5,2	57 La 5,6	72 Hf 5,5	73 Ta 6	74 W 8,0	75 Re 7,9	76 Os 8,7	77 Ir 9,2	78 Pt 9,0	79 Au 9,2	80 Hg 10,4	81 Tl 6,1	82 Pb 7,4	83 Bi 8	84 Po	85 At	86 Em 10,7
			58 Ce (6,9)	59 Pr (5,8)	60 Nd (6,3)	61	62 Sa (5,6)	63 Eu 5,7	64 Gd 6,2	65 Tb (6,7)	66 Dy (6,8)	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb 6,2	71 Cp 5,0	
87 Fa	88 Ra 5,3	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U 4	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm							

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ontladingen in verdunde gassen hebben bijvoorbeeld een grote rol gespeeld bij de ontdekking van de edelgassen. Het gebruik van ontladingen in verdunde gassen voor het opwekken van spectra [4]) is bijna even oud als dat van de bunsenvlam. Meestal gaat het hier om ontladingen met een zg. positieve zuil. In de positieve zuil worden de daarin aanwezige electronen versneld, maar niet verder dan totdat ze voldoende energie hebben verzameld om atomen aan te slaan en te ioniseren. Daardoor wordt min of meer een bovenste grens gesteld aan de electronenenergie, en er stelt zich een snelheidsverdeling in die blijkt overeen te komen met die volgens Maxwell met een fictieve temperatuur T_e (electronentemperatuur). Deze temperatuur is van de orde 1500 U_i en dus bijvoorbeeld in het geval van neon (U_i = 21,5 V) van de orde 30 000 °K. Daarentegen is het gas zelf relatief koud (bijv. <100 °C). Dientengevolge zijn in deze ontlading alleen de processenparen (1) en (2) werkzaam, waarbij het stralingsevenwicht door het ontbreken van instraling weer onvolledig is. De relatieve intensiteiten van de diverse spectraallijnen zijn dan ook in het algemeen niet uit een temperatuurevenwicht af te leiden. In het geval van een gasmengsel kan het spectrum van een stof met hoge ionisatiespanning geheel worden verdrongen door dat van een stof met lage ionisatiespanning. Dit vindt zijn oorzaak daarin dat de electronentemperatuur bepaald wordt door de component met lage ionisatiespanning, mits deze component in voldoende concentratie aanwezig is. Een typisch voorbeeld is de natriumlamp, waarin, om de ontlading in koude toestand te starten, neongas aanwezig is. Bij het ontsteken vertoont deze lamp rood neonlicht, dat echter geleidelijk, naarmate de temperatuur van de lamp stijgt, grotendeels vervangen wordt door geel natriumlicht. De electronentemperatuur daalt daarbij van de hoge waarde die deze in zuiver neon aanneemt tot een veel lagere waarde (ca 9000 °K), die door het natrium wordt bepaald.

Bij de quantitatieve analyse van gasmengsels met behulp van ontladingen bij lage druk moet men hiermee rekening houden en deze bijvoorbeeld alleen toepassen om mengsels van ongeveer dezelfde samenstelling onderling te vergelijken.

Ontlading bij hoge druk; boog en vonk

De boogontlading (ontlading van grote stroomdichtheid, waarbij de kathode thermisch electronen emitteert) in gassen van atmosferische druk onderscheidt zich van het zoëven besproken geval doordat hier het gas wel een hoge temperatuur aanneemt. Dat komt doordat hier de elastische botsingen (botsingen die niet gepaard gaan met ionisatie of aanslag) tussen electronen en gasatomen of -moleculen zo talrijk zijn dat hierdoor een aanzienlijke hoeveelheid kinetische energie aan het gas wordt overgedragen, die alleen langs de weg van warmtegeleiding en straling kan worden afgevoerd. Men mag aannemen dat ook in de boog de electronen een snelheidsverdeling volgens Maxwell hebben. De electronentemperatuur zal echter slechts weinig hoger zijn dan die van het gas. De toestand in de boog is dus vergelijkbaar met die in de vlam, met dit verschil dat de temperatuur meestal veel hoger is. Hierdoor is de boog, in het bijzonder de boog tussen koolelectroden, buitengewoon geschikt als lichtbron voor de spectrochemie: dank zij de hoge temperatuur van de electroden kunnen bijna alle stoffen in de boog tot verdamping worden gebracht en dank zij de hoge temperatuur van het gas komen ook spectraallijnen van elementen met vrij hoge ionisatiespanning te voorschijn.

De verdringing van het spectrum van een moeilijk ioniseerbaar element door dat van een gemakkelijk ioniseerbaar element treedt ook hier in zekere mate op, omdat een element met lage ionisatiespanning sterk wordt aangeslagen en dus krachtig straalt, hetgeen de boogtemperatuur doet dalen. Bij het quantitatieve onderzoek, waar men wenst dat alle spectra onder zoveel mogelijk gelijke condities ontstaan, moet men er daarom voor zorgen dat de te onderzoeken stof slechts in geringe concentratie aanwezig is, zodat zij de temperatuur van de boog weinig beïnvloedt.

Behalve van de boogontlading wordt in de spectrochemie veel gebruik gemaakt van de vonk. Een vonk is een kortstondige ontlading in een dun geleidend kanaal, dat zich in het gas tussen de beide electroden vormt. De toestand in het vonkkanaal is met die in de boogontlading te vergelijken. De electroden zijn echter grotendeels koud, alleen waar de ontlading aangrijpt is de kathode plaatselijk op hoge temperatuur. Er bestaat over het gebruik van de vonk voor de qualitatieve analyse een uitgebreide literatuur [5]). Wij gaan hier echter niet op in, omdat wij ons in dit artikel willen beperken tot de methode die gebruik maakt van de koolboog, gevoed met gelijkstroom.

---

[4]) Zie bijv. W. Elenbaas en J. Riemens, Lichtbronnen voor lijnspectra, Philips techn. T. 11, 303-306, 1949, No. 10.

[5]) Zie bijv. W. Gerlach e.a., Die chemische Emissions-Spektralanalyse I, II en III, Voss, Leipzig 1936.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het verkiezen van de boog boven de vonk berust op de volgende punten:

1) Daar bij de vonkanalyse slechts zeer geringe hoeveelheden stof tot excitatie gebracht worden (0,05-0,5 mg) is de booganalyse, waarbij 5 of 10 mg verdampt en tot emissie gebracht wordt, in het bijzonder daar te prefereren waar het te onderzoeken materiaal niet homogeen is (bijv. bij magneetstaal, siliciumijzer en dergelijke).
2) De vonkanalyse is alleen als speciale routine-analyse te gebruiken voor die materialen welke eenzelfde voorgeschiedenis hebben (de hardheidsgraad van staal heeft bijvoorbeeld invloed op de analyse-uitkomsten, verkregen met de vonk, voor wat betreft de nevenbestanddelen in dit materiaal).
3) De methode der booganalyse is meer universeel, daar het mogelijk is langs deze weg metalen, oxyden, en verbindingen in het algemeen, op overeenkomstige wijze te onderzoeken, terwijl bepaalde kunstgrepen moeten worden toegepast om niet-geleidende stoffen met de vonk te analyseren.

Daarbij is de koolboog in lucht bijzonder geschikt als hulpmiddel vóór de analyse, daar de hoofdmassa waaruit de dampwolk bestaat, constant van samenstelling geacht mag worden (O, N en C).

Verband tussen intensiteit en concentratie

Wij moeten thans de belangrijke vraag bespreken in hoeverre de intensiteit van een bij het onderzoek waargenomen spectraallijn, tot uiting komend in de zwarting van de fotografische plaat waarop het spectrum wordt gefotografeerd, een maat is voor de hoeveelheid van het betrokken element in het te onderzoeken monster. Deze vraag valt uiteen in twee andere:

1) Is de concentratie van het element in de boog evenredig met de hoeveelheid van dit element in het te onderzoeken monster?
2) Is de gemeten lijnintensiteit evenredig met de concentratie van het element in het lichtende gas?

De concentratie van het element in de boog is bepaald door de snelheid waarmee dit element uit het monster verdampt. Zij zal dus niet alleen afhangen van de hoeveelheid van dit element, maar ook van andere eigenschappen, zoals de afhankelijkheid van de dampspanning van het te onderzoeken monster van de temperatuur. Daardoor zal bij eenzelfde hoeveelheid de concentratie in de boog van geval tot geval verschillend zijn. Men ontkomt aan dit bezwaar door het zo in te richten dat een kleine hoeveelheid van het monster in de positieve krater geheel tot verdampen wordt gebracht. Indien men de duur van de opname zich dan laat uitstrekken over de tijd die het monster nodig heeft om geheel in dampvorm over te gaan, dan is uiteraard ieder atoom in het monster in gelijke mate in de gelegenheid licht uit te stralen, en is de door de fotografische plaat geïntegreerde intensiteit onafhankelijk van de bovengenoemde individuele verschillen in verdampingsnelheid. Bovendien kan men desgewenst de verdamping remmen (door toevoeging van een moeilijk te verdampen materiaal, bijvoorbeeld kwarts) of versnellen (door toevoeging van een betrekkelijk gemakkelijk te verdampen materiaal, bijv. nikkel). De waargenomen lijnintensiteit is dus geheel bepaald door de (constante) temperatuur van de boog en door de aanslagspanning, die natuurlijk wel van geval tot geval anders is.

Bij de bedoelde methode met volledige verdamping bevindt de te verdampen stof zich in een holte van de onderste electrode, die als anode fungeert, terwijl de kathode verticaal daarboven is geplaatst. De atomen bewegen zich onder invloed van de convectie in het gas verticaal naar boven, waarna zij ten slotte de ontlading verlaten. Deze verticale beweging wordt nog versterkt doordat een deel der atomen in de vorm van positieve ionen aanwezig is en dus ook door het electrische veld van de boog in de richting van de kathode wordt getrokken, waar ze hun lading afgeven. Ten gevolge daarvan vindt er vóór de kathode een opeenhoping van atomen plaats, zodat in de nabijheid van de kathode, in de zg. kathodelaag, de lichtemissie sterker is dan in de rest van de boog. Gewoonlijk wordt dan ook het licht van de kathodelaag niet voor de quantitative spectraalanalyse gebruikt. Daartoe wordt vóór de boog een scherm geplaatst met een horizontale spleet, die alleen het licht van het middelste deel der boogontlading doorlaat (zie *fig. 6*). In bepaalde gevallen, bijv. bij het onderzoek van elementen die slechts in geringe concentratie aanwezig zijn, maakt men wèl gebruik van het kathodelicht. In dit geval wordt vaak de onderste electrode, die de te verdampen stof bevat, tot kathode gemaakt.

Wij komen nu tot de tweede vraag, namelijk of de lijnintensiteit evenredig is met de concentratie van de betrokken atoomsoort in het gas. Onder de zoëven beschreven omstandigheden zal een zelfde fractie van de betrokken atoomsoort in een bepaalde aangeslagen toestand in het voor de analyse gebruikte deel van de boog aanwezig zijn geweest; men mag dan ook in eerste instantie verwachten dat de totale in een bepaalde spectraallijn uitgezonden hoeveelheid straling evenredig is met het totale in het monster aanwezige aantal atomen van het betrokken element.

Er is echter één factor die hier storend optreedt, namelijk de zelfabsorptie. Als een spectraallijn ontstaat door overgang van een toestand *1* naar

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een toestand 2, dan zal een uitgezonden lichtquantum dat een ander atoom in de toestand 2 ontmoet, dit laatste in de toestand 1 kunnen brengen; dit atoom is dan zelf weer in staat een quantum van dezelfde frequentie uit te zenden.

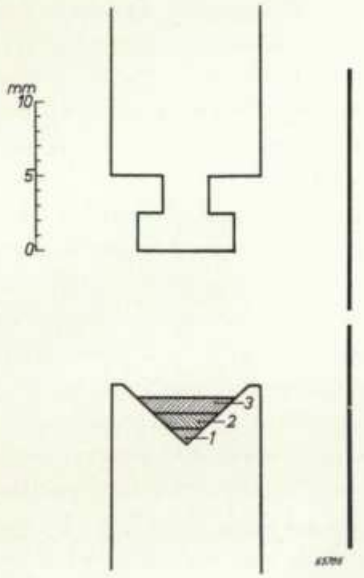


Fig. 6. Opstelling van de electroden. De onderste electrode, die het te verdampen praeparaat bevat, wordt gewoonlijk tot anode gemaakt. Rechts de spleet die het licht van het midden van de boog tot de spectrograaf toelaat. In geval van een moeilijk verdampbare stof bestaat de vulling uit: 1 nikkel, 2 praeparaat, 3 grafiet; in geval van een vrij vluchtige stof is 1 praeparaat, 2 kwarts, 3 grafiet. De bijzondere vorm van de electroden is gekozen om te maken dat de ontlading een symmetrische vorm krijgt.

Bij dit verschijnsel, dat ook resonantie wordt genoemd, gaat dus op zichzelf geen energie verloren. Het lichtquantum wordt echter langer in de ontlading vastgehouden, en de straling vermindert omdat alleen atomen in de buitenste gaslagen hun lichtquanta ongehinderd naar buiten kunnen zenden en de aangeslagen toestanden in het binnenste van de boog meer kans hebben door een van de botsingsprocessen (2) of (3) vernietigd te worden.

Men kan dit, door een enigszins schematische redenering, voor een overgang naar het grondniveau als volgt inzien:

Zij n_0 het aantal atomen in de grondtoestand en n_E het aantal aangeslagen atomen in een toestand E, dan kan het aantal door botsing gevormde aangeslagen atomen worden voorgesteld door Cn_0 en het door botsing vernietigde aantal door $C'n_E$, het aantal uitgestraalde lichtquanta door An_E en het aantal door zelfabsorptie teruggevormde aangeslagen atomen door Zn_0, alles betrokken op de eenheid van tijd. In de stationnaire toestand is

$$n_0 (C + Z) = n_E (A + C') .$$

Het aantal quanta dat de ontladingsruimte per tijdseenheid verlaat is:

$$Q = n_E A - n_0 Z = n_0 \frac{CA - C'Z}{A + C'} \approx n_0 (C - \frac{C'}{A} Z) ,$$

aangezien $C'/C \approx \exp(-E/kT) \ll 1$.

Daar Z evenredig is met de stralingsdichtheid, welke ten ruwste evenredig is met n_0, volgt hieruit dat Q in eerste benadering een quadratische functie is van n_0:

$$Q \approx Cn_0 - Dn_0^2 .$$

De resonantie-absorptie, die vooral optreedt als toestand 2 samenvalt met de grondtoestand, zal sterker zijn naarmate de concentratie van atomen in de toestand 2 groter is. Daardoor zal bij grote concentratie de lijnintensiteit minder dan evenredig met de concentratie der aangeslagen atomen toenemen en dus de geïntegreerde lijnintensiteit niet meer evenredig zijn met het totale aantal verdampte atomen.

Bij overgangen waarbij het eindniveau zelf een niveau is van hoge energie, is de zelfabsorptie meestal gering. Men zal dus bij voorkeur voor het onderzoek gebruik maken van lijnen die „hoog" in het termschema gelegen zijn. Dit is echter niet altijd mogelijk. Als het gaat om de bepaling van kleine hoeveelheden van een bijmengsel, is men meestal aangewezen op zg. hoofdlijnen (principal lines, raies ultimes, letzte Linien), die meestal overgangen naar het grondniveau zijn en die dus wel zelfabsorptie vertonen. Wij zullen hieronder nog zien hoe men in dit geval een correctie voor de invloed van de zelfabsorptie kan aanbrengen.

Uitvoering der metingen

De opstelling waarmee de analysen in het Philips-laboratorium te Eindhoven worden verricht, is in *fig. 7* afgebeeld.

Zoals boven reeds is meegedeeld, wordt een afgewogen hoeveelheid van het monster (5 mg), eventueel vermengd met een bijmengsel om de verdamping te regelen, in de positieve krater gebracht. Daarna wordt de boog ontstoken en het spectrum gefotografeerd. De afstand van de boog tot de spleet van de spectroscoop, en de spleetbreedte (bijv. 0,025 mm) zijn daarbij steeds dezelfde. Vanzelfsprekend wordt steeds van hetzelfde platenmateriaal gebruik gemaakt en wordt steeds bij dezelfde temperatuur ontwikkeld. Fluctuaties in het platenmateriaal, die zelfs bij een volkomen betrouwbaar fabrikaat niet altijd te vermijden zijn, worden door speciale opnamen regelmatig gecontroleerd.

Is de plaat ontwikkeld, gefixeerd en gedroogd, dan bestaat het onderzoek verder uit twee gedeelten:

a) het qualitatieve onderzoek,

b) de intensiteitsmeting.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij het qualitatieve onderzoek gaat het er om, vast te stellen welke elementen in het monster aanwezig zijn. In vele gevallen is dit wel van te voren bekend, maar dan moeten toch de lijnen van de diverse atoomsoorten op de plaat herkend worden en die lijnen worden uitgezocht, die het meest voor meting geschikt zijn. Dit herkennen van de lijnen geschiedt meestal door na te gaan, hoe de methode hiertoe is die van de zwartingsmeting. De plaat wordt geplaatst in een opstelling waarbij een fijne lichtlijn op het fotografische beeld van de spectraallijn wordt afgebeeld. Men bepaalt nu, met behulp van een fotocel en een galvanometer, het quotient van de door het fotografische beeld van de spectraallijn doorgelaten intensiteit I, en van de door een blank plaatgedeelte doorgelaten

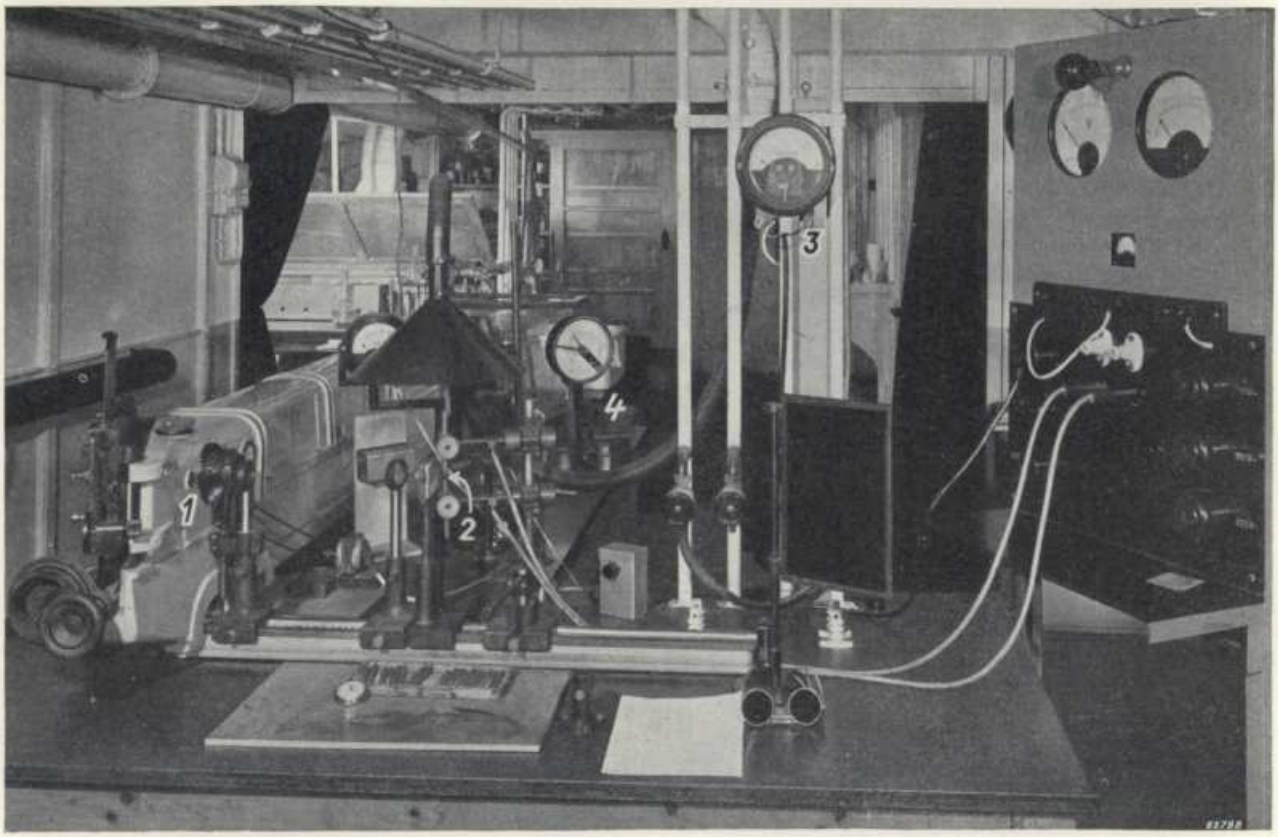


Fig. 7. Foto van de gehele opstelling voor het opnemen van de spectra. Links de automatische kwartsspectrograaf (Hilger 492) met geopende cassette. Op de optische bank bij *1* de spectrograafspleet, waarvóór een draaiende sector en een verzamellens die het licht op het prisma werpt; bij *2* de koolboog met de horizontale spleet, waarboven een afzuiginrichting. Links van de spleet een hulplens die een beeld van de boog projecteert op een scherm naast de spectrograafspleet, waardoor de lichtbron gemakkelijk in de optische as kan worden geplaatst. Achter deze lens de thermoregulateur die de ruimte constant op 21 à 22 °C houdt. Bij *3* de ampèremeter die de boogstroom (10 A) aanwijst. Bij *4* torsiebalans voor het snel afwegen van 5 mg materiaal. Op de achtergrond inrichting voor het uitvoeren van eenvoudige chemische bewerkingen.

lijnen geplaatst zijn ten opzichte van een vast vergelijkingspectrum dat altijd op een andere plaats mee op de plaat wordt gefotografeerd. Men kiest hiervoor meestal het spectrum van de ijzerboog, waarvan de golflengten nauwkeurig bekend zijn.

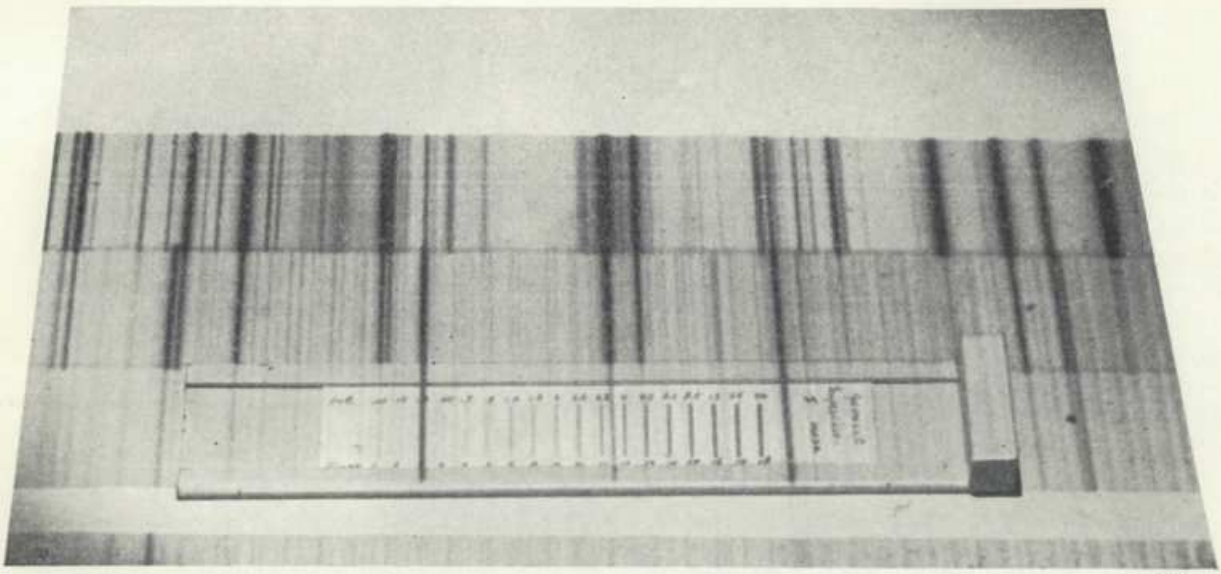
Het qualitatieve onderzoek van het spectrum geschiedt gewoonlijk door de plaat in een apparaat te plaatsen, dat een vergroot beeld van een deel van het spectrum, tegelijk met het vergelijkingspectrum, op een wit scherm ontwerpt (*fig. 8*).

Stel nu dat men een bepaalde lijn uitgekozen heeft waarvan men de intensiteit wil meten. De klassieke intensiteit I_0. De grootheid $D = \log I_0/I$ heet de zwarting. Uit deze zwarting moet dan de intensiteit van het licht dat de zwarting veroorzaakte worden afgeleid. Dit doet men, zoals bekend is, met behulp van een aantal zwartingsmerken, die men verkrijgt door een constante lichtbron op de plaat te laten inwerken, zowel onverzwakt als in bekende verhoudingen verzwakt (met behulp van een snel draaiende sector). De zwarting van de zwartingsmerken wordt tegen de logarithme van de intensiteit uitgezet. Dan ontstaat een kromme die karakteristiek is voor de plaatsoort en ontwikkelmethode.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij dit soort intensiteitsmetingen moet men nog rekening houden met de zwarting van de ondergrond. Ondanks vele voorzorgen valt er namelijk altijd strooilicht op de plaat, waardoor deze een weinig sluiert. Deze sluier voegt zich bij de door de lijn veroorzaakte zwarting en dit moet in rekening worden gebracht door de zwarting van de sluier afzonderlijk te meten, bij voorkeur vlak naast de zwarting van ongeveer 0,075 (84% reflectie) en de donkerste lijn van ongeveer 0,375 (52% reflectie). Deze lijnen zijn genummerd van 1 tot 13. Men verschuift het papier nu zolang, tot het projectiebeeld van de te meten spectraallijn geflankeerd wordt door twee opvolgende lijnen van de schaal en wel zo dat de te meten zwarting tussen de flankerende zwartingen gelegen is. Men kan dan de



65700

Fig. 8. Het projectiescherm waarop het spectrum vergroot is geprojecteerd en waarop de s.p.d.-schaal is gelegd.

te meten lijn, en de hieraan beantwoordende intensiteit van de gemeten intensiteit af te trekken. Aan de intensiteitsmeting komt dus heel wat te pas en dit maakt deze meting dan ook zeer tijdrovend.

Daarom is een vereenvoudiging ingevoerd, die tijd bespaart o.a. doordat de correctie voor de sluier van de ondergrond automatisch geschiedt [6]).

Op het horizontale witte scherm (fig. 8) waarop het spectrum voor het qualitatieve onderzoek wordt geprojecteerd, wordt een zg. s.p.d.-schaal (s.p.d. = standard paper density) gelegd, d.i. een wit stuk papier waarop langs fotografische weg een aantal zwartingsmerken zijn aangebracht. Dit zijn een aantal lijnen die in breedte en scherpte gelijken op de spectraallijnen zoals die bij projectie op het scherm ontstaan, en die door een fotografisch procédé zijn verkregen, waarbij er voor is gezorgd dat hun reflectie-zwarting D^r (logarithme van de verhouding van de terugkaatsing van het witte papier en van het zwartingsmerk) in gelijke stappen (ca 0,025) toeneemt. De zwakste lijn heeft een zwarting van het projectiebeeld uitdrukken in een nummer van de schaal, waarbij na enige oefening nog onderdelen van een stap kunnen worden geschat.

Niet alleen wordt hierdoor het qualitatieve onderzoek met het quantitatieve tot één bewerking verenigd, maar bovendien wordt op deze wijze automatisch een correctie voor de zwarting van de ondergrond verkregen. Dit kan men aldus inzien: de zwarting van het geprojecteerde lijnbeeld op het witte papier van de schaal (logarithme van de verhouding van de helderheid van het witte papier verlicht resp. door de blanke en door de gezwarte plaat heen) zij D_{l+b}; l slaat op de lijn, b op de ondergrond (background). Laat de lijn even zwart gezien worden als een zeker merkteken s van de schaal. Dit merkteken wordt dan echter verlicht door licht dat het gesluierde deel van het negatief naast de lijn is gepasseerd. De zwarting daarvan is dus $D^r{}_s + D_b$ (door de definitie als logarithme zijn de zwartingen additief). Wanneer de sluier niet te sterk is mag men, volgens de ervaring, D_{l+b} vervangen door $D_l + D_b$. Gelijkstelling levert:

[6]) Zie ook N. W. H. Addink, Spectrochimica acta 4, 36-42, 1950 (No. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$$D_l + D_b \approx D_{l+b} = D^r{}_s + D_b\,,$$

of

$$D_l \approx D^r{}_s\,.$$

Men vindt dus ten naastebij direct de gezochte zwarting, D_l, van de lijn zonder sluier! Het is nu voldoende éénmaal, door middel van een schaal van op een fotografische plaat aangebrachte zwartingsmerken, het verband te leggen tussen het nummer van de s.p.d.-schaal en de intensiteit van de te meten spectraallijnen, welke meting slechts af en toe, ter contrôle van de constantheid van het platenmateriaal, behoeft te worden herhaald.

Is de lijnintensiteit bepaald, dan moet nog een verband worden gelegd tussen deze intensiteit en de hoeveelheid van het betrokken element in het monster. Dit geschiedt empirisch door van praeparaten van bekende samenstelling uit te gaan.

Dit sluit niet in dat de spectrochemische analyse volkomen afhankelijk is van de chemische analyse. Men kan namelijk de concentratie geheel spectrochemisch bepalen volgens de zg. additiemethode. Daartoe worden aan het monster dat een onbekende hoeveelheid ($c = x$) van een element bevat, verschillende bekende hoeveelheden ($c-x = m,n,\ldots$) van datzelfde element toegevoegd en de uit de gevonden zwartingen afgeleide intensiteiten tegen de toegevoegde hoeveelheid uitgezet. Extrapoleert men de lijn die de gevonden punten verbindt (zie *fig. 9*) naar intensiteit nul, dan levert de daarbij behorende (negatieve) abscis direct de gevraagde hoeveelheid[7]).

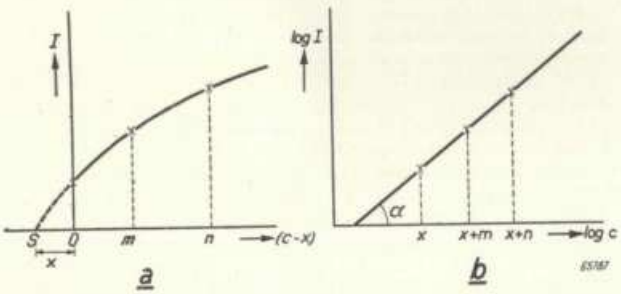


Fig. 9. Ter toelichting van de concentratiebepaling volgens de additie-methode.
a) Door de intensiteit I uit te zetten als functie van de toegevoegde hoeveelheid $(c-x)$, wordt na extrapolatie het punt S bepaald. De afstand SO is de onbekende concentratie, $c = x$.
b) Ter contrôle worden de nu bekende concentraties c dubbellogarithmisch tegen I uitgezet, waarbij een rechte lijn moet ontstaan met $\mathrm{tg}\,\alpha = n \leqq 1$.

Afhankelijk van de hoeveelheid zal men telkens andere spectraallijnen kiezen. Men heeft namelijk graag dat de reflectiezwarting op het scherm in het interval 0,1-0,3 (50-80% reflectie) gelegen is, omdat daar de contrastgevoeligheid van het oog het grootst is.

[7]) Zie N. W. H. Addink, Rec. Trav. chim. Pays-Bas **67**, 690-696, 1948; **70** (1951), ter perse.

Voor een enkele meting is het werk verbonden aan de ijking van de schaal omslachtiger dan de eigenlijke meting, maar dit valt in het niet bij routineonderzoek, waarbij men een groot aantal soortgelijke gevallen te onderzoeken krijgt en dan telkens van dezelfde ijking gebruik kan maken.

Correctie voor zelfabsorptie

Wij willen nog kort ingaan op de wijze waarop de zelfabsorptie bij dit onderzoek tot uiting komt. Zoals reeds werd opgemerkt, zal men deze trachten te vermijden door lijnen te meten die hoog in het termschema thuis horen.

Is er geen zelfabsorptie, dan moet er evenredigheid bestaan tussen de gemeten intensiteit en de hoeveelheid van het element in het monster. Zet men de intensiteit op logarithmische schaal uit tegen de logarithme van de concentratie, dan vindt men een lineair verband met een helling 1:1 (45°). De zelfabsorptie komt nu daardoor tot uiting dat men bij lijnen die deze absorptie vertonen wel in de regel een bij benadering lineair verband vindt tussen de logarithme van de intensiteit en de logarithme van de concentratie, maar met een helling < 1, hetgeen beduidt dat in dit geval niet de eenvoudige formule

$$I = kc$$

geldt, maar de empirische betrekking

$$I = k'c^n \qquad (n < 1)\,.$$

Heeft men eenmaal door proeven met bekende concentraties van een bepaald element voor een zekere lijn de waarde van n vastgesteld, dan kan men daarvan bij onderzoek van een onbekend praeparaat dat dit element bevat gebruik maken.

Voorbeelden

Ten einde een indruk te geven van de bereikte nauwkeurigheid, geven wij ten slotte nog enkele voorbeelden van uitgevoerde analysen.

Het eerste voorbeeld betreft een chroomnikkelstaal. Er werden drie volkomen onafhankelijke analysen verricht, die de volgende resultaten opleverden.

	Fe	Cr	Ni	totaal
	69,5	19,4	9,7	98,6
	71,3	17,8	9,5	98,6
	71,6	18,1	9,5	98,6
gemiddelde	70,6	18,4	9,6	98,6
SD_{rel}	0,8	2,5	1,0	

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De getallen stellen gewichtsprocenten voor; onder iedere kolom is het gemiddelde van die kolom aangegeven en daaronder de relatieve standaardafwijking van het gemiddelde, in procenten van het gemiddelde, dus:

$$SD_{rel} = \frac{100}{y_m}\sqrt{\frac{\sum(y-y_m)^2}{n(n-1)}},$$

waarbij y de gemeten waarde is en y_m het gemiddelde van een kolom ($n = 3$).

De totale duur van de analyse was 2 uur (indien uitgevoerd door één persoon).

Het volgende voorbeeld betreft een magneetstaal. Bij ieder element zijn twee waarden aangegeven, die ieder betrekking hebben op het gemiddelde, verkregen uit vier op één plaat opgenomen spectra, en het gemiddelde van deze twee waarden. In de volgende kolom is, bij wijze van vergelijking, het resultaat van een chemische analyse vermeld en daarnaast het relatieve procentuele verschil (Δ) tussen de chemische en de spectrale analyse.

		spectr.	chem.	Δ
Fe	48,7 - 49,0	48,8	48,9	0,2
Co	24,1 - 23,5	23,8	24,4	2,5
Ni	15,2 - 15,4	15,3	15,0	2
Al	8,1 - 8,1	8,1	8,0	1
Cu	2,9 - 2,9	2,9	2,9	0
Ti	0,82 - 0,82	0,82	0,82	0
Si	0,17 - 0,17	0,17	0,16	
Mn	0,115 - 0,11	0,11	?	
	totaal	100,0	100,2	gem. 1

De relatieve standaard-afwijking van het gemiddelde bij één bepaling bedraagt voor de verschillende elementen 0,5 tot 3% (gemiddeld 2%). Ten einde een relatieve standaardafwijking van 1% te bereiken, zijn dus 4 bepalingen noodzakelijk. De duur van 4 analysen is, indien door één persoon uitgevoerd, 3 uur 20 min.

Als derde voorbeeld zij het onderzoek van carbonaten van aardalkaliën genoemd, met de vermoedelijke samenstelling 40% $BaCO_3$, 35% $SrCO_3$, 25% $CaCO_3$. De relatieve standaardafwijking per bepaling bedroeg voor deze drie bestanddelen resp. 2, 1 en 4%. Daar een grote nauwkeurigheid niet vereist was, werden deze bepalingen in duplo uitgevoerd. Duur der analyse (in duplo) 90 min.

Ten slotte vermelden we de spectrochemische analyse van een glas, waarbij ter vergelijking het resultaat van een chemische analyse van hetzelfde monster vermeld wordt.

	spectrochemisch	chemisch
SiO_2	70,8	70,6
Na_2O	0,2 ± 15% rel.	0,16
K_2O	1,1	0,97
Li_2O	0,9	0,87
B_2O_3	26,3	25,8
MgO	0,008	niet bepaald
Fe_2O_3	0,04	0,05
TiO_2	0,02	niet bepaald
As	0,01	niet bepaald
F	niet bepaald	0,52

Samenvatting. Ter inleiding van een beschrijving van de in het Philips-laboratorium te Eindhoven toegepaste methode van spectrochemische analyse wordt nader ingegaan op de wijzen waarop een spectrum kan ontstaan. Achtereenvolgens worden besproken: het aanslaan van atomen door electronen van constante energie (proef van Franck en Hertz), in een ruimte van constante temperatuur (oven van King), in een vlam, in electrische ontladingen bij lage druk (geisslerbuis) en in electrische ontladingen bij hoge druk (vonk en boog). Toegelicht wordt, welke overwegingen ertoe hebben geleid, de voorkeur te geven aan de gelijkstroom-koolboog. Het te onderzoeken praeparaat wordt in deze boog volledig verdampt, en een constant deel van de geïntegreerde straling wordt in de vorm van een spectrum op een fotografische plaat vastgelegd. Het qualitatieve onderzoek (identificatie der lijnen) en het quantitatieve onderzoek (meting van de zwarting der lijnen) worden tegelijkertijd uitgevoerd, met behulp van een meetprojector die het spectrogram op een scherm projecteert. De te meten zwarting wordt daarbij betrokken op een schaal van zwartingsmerken op wit papier (standard paper density scale). Dit heeft o.a. het voordeel dat automatisch gecorrigeerd wordt voor de ondergrond van het spectrum. De s.p.d.-schaal is eens en voor al geijkt met behulp van zwartingen op een fotografische plaat die door bekende intensiteiten zijn veroorzaakt. In vele gevallen blijkt de intensiteit evenredig te zijn met de hoeveelheid van het onderzochte element. Bij lijnen die zelfabsorptie vertonen, kan het verband door een eenvoudige empirische betrekking worden weergegeven. Het absolute verband tussen intensiteit en concentratie wordt eens en voor al proefondervindelijk vastgesteld. Ten slotte worden enige uitvoeringsvoorbeelden gegeven, betrekking hebbende zowel op metalen als op niet-metalen (bijv. oxyden, glazen, zouten), waarbij de nauwkeurigheid en de duur van de analyse worden vermeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HET SYNCHROCYCLOTRON TE AMSTERDAM

III. DE ELECTROMAGNEET

door F. A. HEYN*). 621.384.61:621.318.3

De grote electromagneet die bij een cyclotron te pas komt, is ongetwijfeld hetgeen bij dit apparaat het meest tot de verbeelding van de leek spreekt. Een geliefkoosde demonstratie aan bezoekers van een cyclotron is het dan ook, het magneetveld in te schakelen en hen de grote magnetische krachten aan den lijve te laten ondervinden, door hun een ijzeren staaf of een koperen ring in handen te geven.

Over de constructie van electromagneten is in de technische literatuur niet veel te vinden. Het is dus niet alleen met het oog op de imponerende afmetingen, dat een nadere beschouwing van de constructie van een cyclotron-magneet de moeite waard lijkt.

Inleiding

De belangrijkste gegevens van het Philips-synchrocyclotron, dat te Amsterdam in het Instituut voor Kernphysisch Onderzoek is opgesteld, zijn vermeld in het eerste artikel van deze reeks [1]). Wij memoreren hieruit dat dit apparaat deuteronen versnelt tot een energie van 28 millioen electronvolt, en dat hiertoe een wisselspanning van bijv. 14 000 volt (topwaarde) tussen de beide Dee's in de versnellingskamer wordt aangelegd.

Het tweede artikel [1]) bevatte een beschrijving van de oscillator, die deze wisselspanning, met een frequentie van $\omega/2\pi = 10{,}7$ MHz, levert, en van de modulator, die een periodieke verlaging van deze frequentie met ca 4% bewerkstelligt

*) Thans hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Delft, voordien verbonden aan het Philips-laboratorium te Eindhoven.

[1]) F. A. Heyn, Het synchrocyclotron te Amsterdam, I. Algemeen overzicht van de installatie, II. De oscillator en de modulator, Philips techn. T. **12**, 245-251 en 251-260, 1950 (No. 9). In het vervolg aangehaald als I resp. II.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

teneinde, ondanks de noodzakelijke daling van de magnetische inductie naar de rand van het magneetveld en ondanks de relativistische massatoeneming, de naar buiten spiraliserende deeltjes in resonantie met de versnellende wisselspanning te doen blijven.

We willen thans de magneet beschrijven, die het sterke veld levert waarin de Dee's worden geplaatst en dat de versnelde deeltjes in cirkelvormige banen dwingt. Daarbij zal worden getracht te doen zien, op grond van welke overwegingen en op welke wijze de vorm en dimensies van de magneet zijn bepaald. Na de constructie van het magnetisch circuit bespreken we nog die van de bekrachtigingspoelen en het koelsysteem.

Grondslagen voor het ontwerp van de magneet

Het uitgangspunt was de te bereiken deeltjesenergie, die op 25 MeV was gesteld. Voor deuteronen met deze energie kunnen we, met voor ons doel voldoende nauwkeurigheid, nog de klassieke formule voor de kinetische energie, $T = {}^1/_2 mv^2$ (v = snelheid, m = deuteronmassa = $3{,}35 \cdot 10^{-27}$ kg), toepassen, waaruit met behulp van de resonantievoorwaarde ($\omega = v/\varrho = eB/m$, zie I) dadelijk volgt:

$$T_{\mathrm{MeV}} = \frac{10^{-6} e}{2m} (B\varrho)^2. \quad \ldots . \quad (1)$$

Hierin is e de elementaire lading = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb, ϱ de straal van de baan in meters, B de magnetische inductie in weber/m² ter plaatse van de baan.

Wensen wij deeltjes met een bepaalde energie, dan is, blijkens de formule, de waarde van het product BR vastgelegd, waarbij R de straal van de grootste baan is die de deeltjes tussen de poolvlakken beschrijven. Uit T = 25 MeV volgt BR = 1,015 Wb/m. R is steeds kleiner dan de straal r van de polen van de magneet. De rand van het magneetveld is nl. (dit zal nog nader blijken) ten gevolge van de te sterke daling van B in deze buurt niet te gebruiken. Meestal is R 80 à 90% van r, zoals ons van bestaande cyclotronmagneten bekend was. Stellen we $R = 0{,}85\ r$, dan moet Br = 1,2 Wb/m zijn. Feitelijk is hierin B de inductie op de baan R, maar we kunnen in eerste instantie er van uitgaan dat de inductie in het gehele interferricum dezelfde waarde heeft.

Een ander belangrijk gegeven voor het ontwerp van de magneet is de poolafstand d. Deze wordt in de eerste plaats voorgeschreven door de hoogte die men aan de Dee's wil geven om een zo groot mogelijke intensiteit van de deeltjesbundel te verkrijgen (zie I). Verder is er tussen de op hoge spanning komende Dee (de andere is geaard) en de deksels van de versnellingskamer een niet al te kleine afstand gewenst, om met zekerheid een overslag te vermijden alsook om de capaciteit tussen deze Dee en aarde niet al te groot te laten worden (zie II). Ten slotte moet men de nodige ruimte voor de aan te brengen apparatuur hebben, o.a. voor de ionenbron. Wij gingen uit van een waarde d = 36 cm.

Uit de beide gegevens die nu vaststaan, Br en d, kunnen wij, om ons alvast een voorstelling te maken van de vereiste magneet, de magnetische energie uitrekenen die in het interferricum aanwezig moet zijn. Hiervoor geldt de formule:

$$W_m = \tfrac{1}{2} B H \cdot (\text{volume interferricum}), \quad (2)$$

waarin $H = B/\mu_0$ de magnetische veldsterkte is [2]). Dus is:

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \pi r^2 d = \frac{\pi}{2\mu_0} (Br)^2 d,$$

hetgeen na substitutie van de waarden Br = 1,2 en d = 0,36 levert:

$$W_m \approx 650\,000 \text{ wattseconden.}$$

Dit getal krijgt het nodige relief als we er aan toevoegen dat de magnetische energie in de luchtspleet van een krachtige electrodynamische luidspreker ongeveer ${}^1/_4$ Wsec bedraagt.

Het probleem, hoe het magneetveld met de gewenste waarden van Br en d moet worden verkregen, wordt voor een deel door technische, maar nog meer door economische overwegingen beheerst.

Verschillende technische overwegingen pleiten voor de keuze van een kleine pooldiameter $2r$, dus een grote inductie B: de Dee wordt dan niet overmatig zwaar, wat van belang is omdat zijn gewicht moet worden gedragen door een Lecherleiding die slechts op vrij grote afstand van de Dee door keramische isolatoren kan worden gesteund (zie II); de capaciteit van de Dee wordt beperkt; de afmetingen van de gehele (geëvacueerde) versnellingskamer worden beperkt, waardoor men deze gemakkelijker bestand kan maken tegen de krachten van de luchtdruk, minder kans heeft op lekken en minder last van vrijkomende gassen. Tegenover deze voordelen staat dat een grote inductie B, zoals we straks zullen zien, in economisch opzicht schadelijk is. Alleen bij zeer grote synchrocyclotrons zal het compromis tussen B en r meer door de technische overwegingen worden bepaald,

[2]) We herinneren er aan dat in het systeem van de hier gebruikte gerationaliseerde Giorgi-eenheden de permeabiliteit van lucht (of vacuum) $\mu_0 = 4\pi/10^7$ henry/meter is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

daar bij zeer grote r de technische moeilijkheden haast onoverkomelijk worden.

Bij de economische overwegingen moeten wij onderscheid maken tussen de investeringskosten en de bedrijfskosten. Onder de bedrijfskosten vallen, behalve de kosten van het bedienende personeel, in hoofdzaak het stroomverbruik en het verbruik van koelwater; het gehele vermogen, dat door de ohmse weerstand van de bekrachtigingswikkeling in warmte wordt omgezet, moet nl. door een koelinstallatie weer worden afgevoerd. Onder de investeringskosten tellen we o.a. die van deze koelinstallatie en die van de omvormer die de vereiste gelijkstroom moet leveren. Al deze kosten worden kleiner naarmate we het vereiste electrische vermogen kleiner houden. Maar het grootste gedeelte van de investeringskosten wordt veroorzaakt door de vereiste hoeveelheid staal [3]) voor het magnetisch circuit en koper voor de wikkeling. Willen we het electrisch vermogen klein houden, dan moeten we de koperdoorsnede van de wikkeling groot maken, we hebben dus zeer veel koper nodig, en aangezien het gesloten magnetische circuit de nodige ruimte moet laten om de wikkeling er in onder te brengen, wordt ook de vereiste hoeveelheid staal groter naarmate we het vermogen meer trachten te beperken.

Wij zien dus dat het te kiezen vermogen een compromis zal moeten vormen tussen bedrijfs- en investeringskosten. Het is heel instructief in dit verband even in te gaan op de mogelijkheid, die men in principe heeft, de bedrijfskosten wat betreft electriciteit en water geheel tot nul te reduceren, nl. door gebruik van een permanente magneet! Een kleine berekening zal plausibel maken dat dit „compromis" zeker niet het optimale is. Onder geïdealiseerde omstandigheden kunnen wij de volgende vergelijking voor de permanente magneet opschrijven [4]):

$$\tfrac{1}{2} B_{\text{lucht}} \cdot H_{\text{lucht}} \cdot \text{volume luchtspleet} = \\ = -\tfrac{1}{2} B_{\text{staal}} \cdot H_{\text{staal}} \cdot \text{volume magneetstaal.} \quad (3)$$

Links staat weer de magnetische energie in de luchtspleet, W_m, rechts die in het magneetstaal. Het product $B_{\text{staal}} \cdot H_{\text{staal}}$ hangt sterk af van de staalsoort en van het punt van de B-H-kromme waarop men dank zij de vormgeving van het circuit en de voorgeschiedenis komt te werken. Bij een modern soort magneetstaal, nl. „Ticonal" 2A (er bestaan nog wel betere soorten maar deze zijn veel duurder) kan het product maximaal ongeveer — 15 000 Wsec/m³ (d.i. $-1{,}8 \cdot 10^6$ gauss·oersted) zijn; practisch zal men, o.a. de spreiding in rekening brengend, misschien met een waarde van —10 000 Wsec/m³ mogen rekenen. Gebruik makend van de waarde W_m = 650 000 Wsec vindt men dus dat de permanente magneet globaal 130 m³ oftewel 1000 ton magneetstaal zou moeten bevatten! Door de kostbare legeringsbestanddelen en de gecompliceerde bereiding kost het magneetstaal een veelvoud van het „gewone", voor een electromagneet geschikte, staal, en bij de electromagneet van ons cyclotron bleken wij met „slechts" 200 ton van dat staal uit te komen. Het is dus wel duidelijk dat een permanente magneet, zelfs al hadden we de bijkomende technische moeilijkheden kunnen overwinnen [5]), niet in aanmerking kwam.

Keren we terug naar het te kiezen vermogen voor de electromagneet. Het noodzakelijke compromis tussen investeringskosten en bedrijfskosten zal natuurlijk sterk worden beïnvloed door de plaatselijke prijzen van electriciteit en koelwater, alsmede door de prijs van het nodige (electrolytische) koper en het staal. Wat deze laatste betreft, zij opgemerkt dat men, voor een gegeven vermogen, constructies met veel staal kan maken waarbij relatief weinig koper nodig is, en omgekeerd. Er bestaat een optimale verhouding tussen de hoeveelheden staal en koper, die op haar beurt beïnvloed wordt door het verband tussen de kwaliteit van het staal en de prijs er van. De kwaliteit komt tot uitdrukking in de B-H-kromme van het staal. Hoe betere kwaliteit, hoe minder staal èn koper men bij gegeven vermogen nodig heeft.

Men ziet dat het nogal ingewikkeld wordt de uit economisch oogpunt gunstigste constructie te vinden. In ons geval werd het probleem vereenvoudigd door het feit dat er reeds een omvormer beschikbaar was, voor een vermogen van ruim 80 kW, d.i. van dezelfde orde als gebruikt wordt bij andere cyclotrons voor ongeveer dezelfde deeltjesenergie. Verder lag ook de kwaliteit van het staal vast,

---

[3]) Alle tegenwoordig als constructiemateriaal gebruikte ijzersoorten, ook het „week ijzer" van een electromagneet, behoren volgens de nieuwe nomenclatuur als staal te worden aangeduid (het criterium is het optreden van een α-γ-overgang, niet zoals vroeger een minimum koolstofgehalte).

[4]) Zie A. Th. van Urk, Het gebruik van moderne staalsoorten voor permanente magneten, Philips techn. T. **5**, 33-40, 1940. — Het min-teken in de vergelijking komt doordat H_{staal} bij de permanente magneet altijd tegengesteld is aan B_{staal} („ontmagnetiserende veldsterkte").

[5]) Het magnetiseren van de permanente magneet zou in situ moeten gebeuren, waartoe een slechts eenmaal te gebruiken enorme hulpwikkeling en bekrachtigingsinstallatie zou moeten worden gebouwd. Ook zou het feit dat men de permanente magneet niet tijdelijk kan uitschakelen, bij het uitvoeren van werkzaamheden aan de versnellingsapparatuur enz. grote complicaties hebben meegebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

daar ons slechts een bepaalde soort staal ter beschikking stond [6]). Het probleem werd daarmee gereduceerd tot de vraag, wat bij gegeven vermogen en staalkwaliteit de optimale verhouding van de hoeveelheden staal en koper is, en hoe het magnetisch circuit en de wikkeling gedimensionneerd moeten worden om deze optimale verhouding te realiseren.

Door de gegeven omvormer wordt een bovenste grens aan de stroom I en aan de spanning V van de wikkeling van de magneet gesteld, in casu ca 175 A en ca 500 V. Het is van belang hier op te merken dat deze beperking in de keuze van I, bij gegeven vermogen, geen belemmering vormt om het boven bedoelde optimum te kunnen verkrijgen. Het magnetische veld in een gegeven magnetisch circuit wordt immers alleen bepaald door het aantal ampèrewindingen, nI, en bij gegeven product nI laat de nadere keuze van n en I in eerste instantie het voor de wikkeling vereiste volume koper onbeïnvloed. Kiezen we I klein (n groot), dan mag voor het gegeven vermogen $W = r_k I^2$ de weerstand r_k van de wikkeling groot worden, kiezen we I groot (n klein), dan moet r_k klein zijn, en het blijkt dat op grond hiervan de koperdoorsnede voor de vele windingen van het eerste geval juist zoveel kleiner mag worden gekozen dan voor de weinige windingen van het tweede geval, dat het totale volume koper in beide gevallen (mits de gemiddelde lengte per winding dezelfde is) even groot wordt.

Ook al waren aan de keuze van I en V niet reeds door de beschikbare omvormer de genoemde grenzen gesteld, dan zou toch het gezichtspunt van de bedrijfszekerheid er toe genoopt hebben de spanning op de wikkeling niet al te hoog te kiezen. Immers, het is beslist noodzakelijk de kans op doorslag van de wikkeling vrijwel nihil te maken, gezien de omvangrijke werkzaamheden die voor een eventuele reparatie van dit onderdeel nodig zouden zijn. Alleen bij betrekkelijk lage spanning kan men dit waarborgen zonder al te veel isolatiemateriaal in de wikkeling nodig te hebben, dus zonder de „vulfactor" van de wikkeling (percentage koper in het gehele volume) al te ver beneden 100% te doen dalen.

Anderzijds zou men ook niet een veel lagere spanning en grotere stroom dan de genoemde, van ca 500 V en 175 A, kunnen kiezen, omdat grotere stroomsterkten tot nogal ongewone dynamoconstructies zouden leiden, en bovendien omdat de corresponderende zeer kleine weerstand r_k van de wikkeling (in ons geval moest deze reeds tot ongeveer 3 ohm worden beperkt) allerlei constructieve moeilijkheden kan meebrengen (invloed van overgangsweerstanden, ongelijkmatigheden in de warmteontwikkeling, enz.).

Gang van het ontwerp

Algemene bouw van de magneet

De algemene bouw van de te ontwerpen electromagneet volgt uit enkele voor de hand liggende overwegingen. Het magnetische veld in het interferricum moet in eerste aanleg homogeen zijn en symmetrisch ten opzichte van het middenvlak, dus voeren wij de wikkeling het best uit in de vorm van twee spoelen, elk aan een zijde van het interferricum geplaatst. De beide cylindrische polen, waar de spoelen omheen zijn gelegd, oefenen een grote kracht op elkaar uit (in ons geval, zoals men kan becijferen, ongeveer 2 millioen newton, overeenkomend met ca 200 ton gewicht); toch moet de vervorming gering en in elk geval symmetrisch zijn, om het veld niet ongunstig te beïnvloeden. In het bijzonder moeten de poolvlakken nauwkeurig evenwijdig blijven. Ten slotte moet het interferricum goed toegankelijk zijn met het oog op het plaatsen van de eigenlijke versnellingsapparatuur. De in *fig. 1* getekende vorm van de magneet voldoet aan al deze eisen. Wij hebben in deze figuur de magneet in zijn uiteindelijk gekozen vorm op schaal getekend, en de ware afmetingen zijn in de figuur aangegeven. De belangrijkste taak bij het ontwerpen was natuurlijk juist, deze afmetingen vast te stellen, met het eerder genoemde doel voor ogen het gewenste veld te realiseren met het gunstigste compromis wat betreft het nodige volume koper en het nodige volume staal.

Als grondslag voor de berekening van de magneet dient de betrekking:

$$nI = \oint H\,dl\,, \qquad \ldots\ldots \quad (4)$$

die zegt, dat de lijnintegraal van de magnetische veldsterkte, genomen rondgaande langs een krachtlijn (of langs een willekeurige gesloten lijn die door alle windingen wordt omvat), gelijk is aan het aantal ampèrewindingen nodig voor het produceren van het veld. We kunnen de integraal splitsen in een gedeelte, behorend bij de weg die men bij de integratie in lucht moet afleggen — d.i. in ons geval de poolafstand d — en twee verdere gedeelten, behorend bij de integratieweg in de beide polen en bij die in het juk, dat de kring sluit:

$$nI = (\int H\,dl)_{\text{lucht}} + (\int H\,dl)_{\text{polen}} + (\int H\,dl)_{\text{juk}}. \quad (5)$$

[6]) De eigenschappen en de vervaardiging van deze staalsoort zijn geruime tijd geleden in dit tijdschrift beschreven: J. J. Went, Philips techn. T. **10**, 247, 1948. Het dient hier te worden opgemerkt dat een naderhand verkregen duidelijker inzicht in de specifieke eisen die bij ons cyclotron aan het staal moesten worden gesteld, heeft geleerd dat het bewuste staal zonder extra kosten nog gunstiger eigenschappen (met name een hogere verzadigingsmagnetisatie) had kunnen krijgen. De gietingen waren toen echter al geschied.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

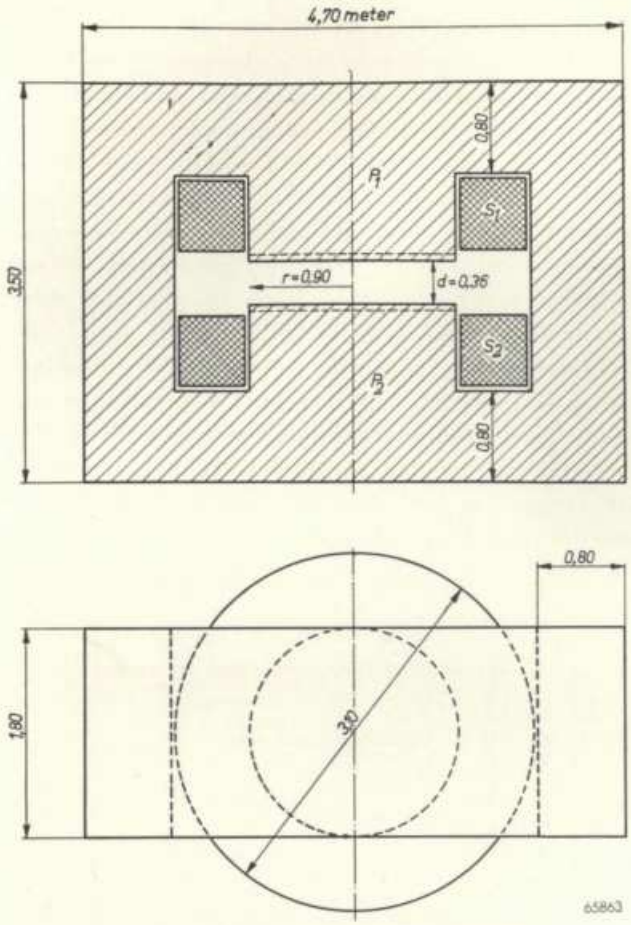


Fig. 1. Vorm van de electromagneet van een synchrocyclotron, in doorsnede en bovenaanzicht. Om elk van de beide polen P_1, P_2 is een ringvormige spoel geplaatst (S_1, S_2).
Het interferricum bestaat in werkelijkheid uit drie gedeelten. Tussen de polen wordt nl., met er boven en er onder een luchtspleet van 2 cm, de versnellingsdoos geplaatst; het zware stalen onder- en bovendeksel hiervan moeten tot de polen worden gerekend. Eenvoudigheidshalve hebben we in de figuur de drie interferrica samengetrokken tot één; waar in de tekst van „poolafstand" wordt gesproken, is de lengte van dit resulterende interferricum bedoeld.

Geïdealiseerd geval

De veldsterkte in het interferricum is $H = B/\mu_0$, dus voor de luchtterm is het nodige aantal ampèrewindingen:

$$(nI)_{\text{lucht}} = B\,d/\mu_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Aangezien de luchtterm, zoals we vooruitlopend op het volgende kunnen zeggen, 70 à 80% van het totaal zal uitmaken (dit percentage noemt men de „efficientie" van de magneet), kunnen we voor een eerste orientering de staaltermen geheel verwaarlozen (de magnetische weerstand van het staalcircuit gelijk nul stellen) en ons dan afvragen welke waarde van B, of, aangezien het product Br = 1,2 Wb/m van meet af aan voorgeschreven is, welke poolstraal r aan het meervermelde gunstigste compromis zal beantwoorden.

Dàt er een compromis nodig is, kunnen we nu als volgt inzien. Met toenemende poolstraal r wordt de gemiddelde koperlengte per winding groter, maar dank zij de daling van B wordt de vereiste $(nI)_{\text{lucht}}$ kleiner (verg. 6). Met behulp van een eenvoudige berekening toont men aan, dat hierdoor de vereiste hoeveelheid koper aanvankelijk met toenemende r daalt, en boven een bepaalde r, in ons geval reeds boven $r \approx 1{,}2$ m, onafhankelijk van r wordt (en ook vrijwel onafhankelijk van de, nog te variëren, poollengte, die gelijk is aan de spoelhoogte, zie fig. 1). Tevens echter neemt de nodige hoeveelheid staal — we nemen de doorsnede van het circuit in eerste instantie overal even groot en laten het circuit zo nauw mogelijk om de wikkeling sluiten — sterk toe met toenemende r. Bij zeer grote r hebben we dus een constante hoeveelheid koper maar steeds meer staal nodig, bij zeer kleine r komen we (in deze benadering) met steeds minder staal toe maar de nodige hoeveelheid koper gaat wegens de grote B sterk stijgen. Rekening houdend met de prijzen van koper en staal vonden wij voor de totale materiaalkosten een vlak minimum tussen $r \approx 0{,}6$ en 1,0 meter, dwz. met een B tussen 2,0 en 1,2 Wb/m². De luchtterm vereist hierbij tussen 600 000 en 350 000 ampèrewindingen: in dit gebied ligt dus het bedoelde optimum — steeds nog onder verwaarlozing van de magnetische weerstand van het staal.

Gezien de in het begin van dit artikel genoemde technische overwegingen zouden we de kleinste r, binnen het optimale gebied, willen kiezen (r = 0,6 m). Juist aan deze zijde echter zal dit gebied aanzienlijk worden versmald, als we nu rekening gaan houden met de magnetische weerstand van het staal. Immers, deze weerstand zal extra ampèrewindingen, dus extra koper vragen, en wel des te meer naarmate de inductie in het staal groter is, dwz. naarmate we een kleinere poolstraal kiezen; de hoeveelheid koper zal dus bij dalende r steiler oplopen dan in het ideale geval. Tot welke r zal het optimale gebied zich nu nog uitstrekken?

Het is goed zich te realiseren dat deze vraag niet meer exact kan worden beantwoord, door de volgende oorzaken.

Moeilijkheden bij het in rekening brengen van de magnetische weerstand van het staal

Het beantwoorden van de vraag komt neer op het berekenen van de beide staaltermen in verg. (5). Hiervoor moeten we gebruiken ten eerste de voorwaarde dat de magnetische flux in elke doorsnede (oppervlakte A) van het circuit — als we een ogenblik afzien van de spreiding der krachtlijnen —

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dezelfde waarde moet hebben:

$$B_{\text{staal}} \cdot A_{\text{staal}} = \text{const.} = B_{\text{lucht}} \cdot \pi r^2 ; \quad . \quad (7)$$

en ten tweede het verband tussen inductie B en veldsterkte H in het staal, dat gegeven wordt door:

$$B = \mu_0 H + J(H) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

J is de magnetisatie, die volgens een, voor elke staalsoort empirisch vastgelegde, functie afhangt van H.

Uit deze vergelijkingen kan men in principe de waarde van H in elk punt van een aangenomen circuit bepalen, en dus de lijnintegraal (4) voor diverse waarden van de poolstraal berekenen. Deze berekening is echter met een relatief grote onzekerheid behept. In de eerste plaats gaat verg. (7) slechts in zeer ruwe benadering op: een aanzienlijk deel van de magnetische flux loopt nabij de vrije einden van de polen zijdelings uit het staal en de krachtlijnen sluiten zich buiten het circuit om. Deze spreiding, die bij elke inductie optreedt en die van de dimensionnering afhangt, kan practisch niet worden berekend doch moet worden geschat resp. empirisch worden bepaald (zie bijv. het in [4]) aangehaalde artikel). Ten tweede: de magnetisatie J vertoont als functie van H het bekende verschijnsel van de verzadiging. Bij grote H-waarden, waar men de maximaal mogelijke magnetisatie J_s nadert en de J-H-curve dus zeer vlak loopt, brengen kleine wijzigingen in B, bijv. veroorzaakt door een geringe wijziging van de desbetreffende doorsnede A in het proefontwerp, reeds grote veranderingen in de vereiste H mee, wat de berekening uiteraard onzeker maakt. Bovendien is de fluxdichtheid B, nabij de hoeken van het staalcircuit (fig. 1) en vooral nabij de overgang van het juk naar de ronde pool, zeker niet constant over de gehele staaldoorsnede, en we weten niet precies met welke „effectieve" waarde van B we hier moeten rekenen. Vervolgens is de mate waarin men de verzadiging van het staal nadert, weer van invloed op de spreiding: de krachtlijnen lopen voor een groter percentage uit het staal naarmate dit meer verzadigd raakt — een invloed die nog minder exact in rekening is te brengen. Ten slotte is het verloop van de J-H-curve nabij de verzadiging zeer gevoelig voor kleine afwijkingen in de bereiding van het staal. Verschillen in dit opzicht werden bij enkele van de blokken staal waaruit onze magneet werd opgebouwd inderdaad waargenomen.

Nadere bepaling van de te kiezen poolstraal

Ten gevolge van de vermelde onzekerheden kunnen we weliswaar het verloop van de totale materiaalkosten als functie van de poolstraal r niet exact voorspellen, maar we kunnen nu toch tot een nadere bepaling van de minstens vereiste straal komen door de volgende eenvoudige redenering.

Zodra de magnetisatie van het staal haar maximale waarde J_s heeft bereikt, kan een verdere verhoging van de inductie B alleen worden verkregen door de term $\mu_0 H$ in verg. (8), juist zoals dit in de luchtspleet het geval is. Het staal gaat zich dan „als lucht gedragen". Het bijbehorende stuk van de lijnintegraal: $\int H_{\text{staal}}\, dl$, dat bij kleine inducties zeer gering blijft, gaat dan snel toenemen en er zijn dus vele ampèrewindingen voor nodig. Om dit te vermijden, moeten wij de constructie zo maken dat nergens in het staal de verzadigingsmagnetisatie J_s te dicht wordt genaderd.

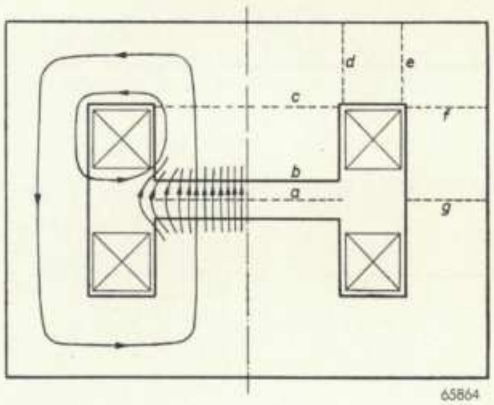


Fig. 2. In verschillende doorsneden (a-g) van het staalcircuit wordt de inductie nader beschouwd. In de linkerhelft van de figuur is zeer schematisch het verloop der krachtlijnen aangegeven.

In dit opzicht moest als de gevaarlijkste plaats worden beschouwd de doorsnede c in *fig. 2*. Dat de gevaarlijkste plaats in ieder geval in de polen zal liggen, is gemakkelijk te voorzien: een vergroting van de doorsnede — het middel om de inductie en dus J te verlagen — is in de polen kostbaarder dan elders in het circuit: dikkere polen kosten natuurlijk meer staal, maar tevens meer koper doordat de gemiddelde windingsdiameter groter wordt, en daardoor nog eens extra meer staal omdat de grotere buitendiameter van de spoel langere horizontale jukdelen nodig maakt. Inderdaad is bij alle bestaande cyclotronmagneten de inductie het grootst in de polen, en wel meestal ter plaatse of nabij c. We konden dus beginnen met op deze plaats voor J de maximaal toelaatbare waarde aan te nemen, dat was voor ons staal 2,0 Wb/m². Deze waarde wordt volgens de J-H-kromme bereikt bij een waarde van $\mu_0 H = 0{,}1$ Wb/m², dus de inductie in doorsnede c wordt: $B_c \approx 2{,}1$ Wb/m².

In de poolvlakken, doorsnede b, en in de luchtspleet, doorsnede a in fig. 2, is de flux aanzienlijk

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kleiner dan in c, ten gevolge van de spreiding. Uit modelproeven en uit gegevens van bestaande cyclotronmagneten was ons bekend dat de verhouding der fluxwaarden in c en a, de zg. spreidingscoëfficient, op ongeveer 1,5 kan worden gesteld. Aangezien de doorsneden a en c in fig. 2 even groot zijn, volgt hieruit dat we met ons staal de inductie in de spleet niet groter mochten kiezen dan $B_a = 1{,}4$ Wb/m². Om enige reserve te hebben, voor het geval dat J_s in sommige staalblokken wat lager zou uitvallen, kozen wij $B_a = 1{,}35$ Wb/m² (B_c wordt dan $= 2{,}06$ Wb/m², $\mu_0 H_c = 0{,}07$ Wb/m²). Uit de voorgeschreven waarde van het product $Br = 1{,}2$ Wb/m in de luchtspleet volgt nu een straal $r = 0{,}9$ m (afgerond) voor de polen.

Bij keuze van een grotere r zouden weliswaar de staaltermen in verg. (5) nog iets afnemen, maar de materiaalkosten voor de zoveel grotere luchtterm zouden, zoals we gezien hebben, tot $r = 1{,}0$ m vrijwel constant blijven en dan zelfs gaan toenemen.

Overige dimensies van het circuit

De zojuist vermelde modelproeven werden genomen met een eenvoudig gevormd model op schaal 1:20. Dit model en een later vervaardigd tweede model, op dezelfde schaal maar van gewijzigde vorm, hebben ons de nodige gegevens wat betreft de spreiding enz. verschaft om behalve de poolstraal ook andere details van de vorm van het circuit nader te kunnen kiezen.

Bij het eerste model waren verschillende doorsneden van het juk, nl. in d, e en f (we bedoelen telkens de totale doorsnede van de beide „parallel geschakelde" takken), even groot gemaakt als doorsnede c. Uit metingen bleek dat de flux in deze doorsneden practisch even groot was als in c. Bij het tweede model (en bij de werkelijke magneet) hebben wij de genoemde jukdoorsneden groter gemaakt dan de pooldoorsnede c, en wel — op grond van enige proefberekeningen — 13% groter. Weliswaar kost dit meer staal, doch dit wordt ruimschoots gecompenseerd door de besparing aan ampèrewindingen en dus aan koper. Immers, de verlaging van de inductie met 13%, van 2,06 tot 1,825 Wb/m², gaat gepaard met een veel aanzienlijker vermindering van $\mu_0 H$, nl. van 0,07 tot 0,015 Wb/m², en deze vermindering zet zoden aan de dijk door de grote lengte van de integratieweg in het juk!

Over de vorm van de spoeldoorsnede, dwz. de verhouding van hoogte h en dikte D, kon reeds worden beslist nog vóór de poolstraal definitief werd vastgelegd, op grond van de volgende overwegingen. Naarmate men h groter kiest, komt men tot langere polen, die meer staal en — wat erger is — ook meer ampèrewindingen kosten, deels wegens de langere integratieweg met hoge veldsterkte, deels wegens een grotere spreiding, die de „efficientie" van het circuit vermindert. Bovendien is dan ook meer staal nodig voor de verticale jukdelen, die tezamen met de polen langer moeten worden. Men kan dit staal niet terugwinnen door deze verticale delen dichter bij elkaar te plaatsen (wat mogelijk lijkt omdat de spoeldikte D door de grotere spoelhoogte kleiner wordt): de efficientie zou dan nog slechter worden doordat een groter percentage van de krachtlijnen rechtstreeks van de polen naar deze jukdelen zou lopen. Naarmate men daarentegen h kleiner kiest, moet voor een gegeven aantal ampèrewindingen de gemiddelde straal der op elkaar gelegde windingen groter worden. Dit nadelige effect overtreft al spoedig de besparing in ampèrewindingen door de kortere polen, en ook de hieruit volgende besparing in staal wordt te niet gedaan door het meerdere staal dat nodig is omdat de horizontale jukdelen nu langer moeten worden. Noch heel grote noch heel kleine spoelhoogten zijn dus gunstig, en een ongeveer vierkante spoeldoorsnede is in feite het best. Geringe afwijkingen hiervan maken voor de totale materiaalkosten niet veel uit, zoals uit proefberekeningen blijkt. Terloops zij opgemerkt dat men bij deze berekeningen de vulfactor van de wikkeling in aanmerking moet nemen, die bij verschillende vormen enigszins verschilt.

Balans der ampèrewindingen

Hiermee zijn in grote trekken de overwegingen geschetst waardoor de dimensies van het magnetische circuit werden vastgelegd. Op grond hiervan kon het tweede model worden gebouwd, en er kon ook alvast ruwweg worden berekend welk aantal ampèrewindingen elk deel van dit model zou opeisen. *Tabel I* geeft het resultaat van de berekening, alle getallen omgerekend op de afmetingen van de werkelijke magneet, en wel voor de gewenste inductie $B_a = 1{,}35$ Wb/m² in de luchtspleet en ook voor de wat grotere waarde $B_a = 1{,}40$ Wb/m². Ter toelichting moeten we nog vermelden dat voor slechts $^1/_3$ van de poollengte de hoge inductie $B = 2{,}06$ Wb/m² van doorsnede c in rekening werd gebracht. Aan het eindvlak van de pool, doorsnede b, is ten gevolge van de spreiding de inductie blijkens de modelproeven reeds 20% lager dan in c; de veldsterkte in het staal is hier derhalve al vrijwel te verwaarlozen. Op grond van een meting van de inductie aan het eerste model op verschillende plaatsen tussen c en b, konden we het veldverloop

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Balans der ampèrewindingen, benodigd voor het tweede model van de magneet (omgerekend op de ware afmetingen) volgens gegevens over de spreiding verkregen o.a. uit het eerste model.

Deel van circuit	Lengte	B_a = 1,35 Wb/m²					B_a = 1,40 Wb/m²				
		B	$\mu_0 H$	H	nI	%	B	$\mu_0 H$	H	nI	%
	m	Wb/m²	Wb/m²	A/m	A		Wb/m²	Wb/m²	A/m	A	
luchtspleet	0,36	1,35	1,35	1 075 000	387 000	76	1,40	1,40	1 115 000	400 000	70
$^2/_3$ pool	1,03	—	0,035	27 900	57 000	11	—	0,05	40 000	82 000	14,5
$^1/_3$ pool	0,513	2,06	0,07	55 800			2,10	0,1	80 000		
juk	5,5	1,825	0,015	12 000	66 000	13	1,86	0,02	16 000	88 000	15,5
Totaal					510 000	100				570 000	100

in de pool schematisch voorstellen als constant ($H = 55\,800$ A/m) over $^1/_3$ van de lengte, en dan lineair dalend tot vrijwel 0 aan het einde, zodat we voor $^2/_3$ van de lengte de gemiddelde waarde $H = 27\,900$ A/m in rekening brachten. De hierin schuilende onnauwkeurigheid is heel onschuldig, vergeleken met de bronnen van onzekerheid die de berekening op zichzelf bevat en waarover wij hierboven hebben uitgeweid.

De efficientie die op grond van deze balans van de ampèrewindingen kon worden verwacht, nl. 76%, is heel bevredigend te noemen.

Metingen aan het tweede model leerden dat de gemaakte onderstellingen omtrent de spreiding goed met de werkelijkheid overeenkwamen. Het is dus geen wonder dat ook het berekende totale aantal ampèrewindingen behoorlijk bleek te kloppen met het aantal dat bij het uitgevoerde model nodig was om de gewenste inductie in de luchtspleet te bereiken. *Tabel II* geeft de getallen. Het model bleek iets minder ampèrewindingen nodig te hebben dan verwacht werd.

Verder bleek uit de metingen aan het tweede model, dat 6% van de flux zich rondom de afzonderlijke spoelen sluit (zie de in fig. 2 geschetste krachtlijnen; de flux door g is 6% kleiner dan die door f). Dit is vrij veel, het kon echter toch niet een noemenswaardige vergroting van de afstand der verticale jukdelen rechtvaardigen.

Tabel II. Het benodigde totale aantal ampèrewindingen voor het verkrijgen van de inductie B_a in de luchtspleet. Tussen haakjes de efficientie.

B_a Wb/m²	nI, berekend	nI, gemeten aan tweede model (omgerekend op ware afmetingen)	nI, gemeten aan uitgevoerde magneet
1,35	510 000 (76%)	470 000 (80%)	497 000 (78%)
1,40	570 000 (70%)	527 000 (74%)	548 000 (73%)

We kunnen thans van het ontwerp overgaan naar de uitgevoerde magneet en het verkregen veld.

Enkele punten in bovenstaande globale schets van de gang van het ontwerp vragen nog om aanvulling. In het bijzonder de kwestie van de nadere keuze van r als we de magnetische weerstand van het staal in aanmerking nemen. We hebben de poolstraal zo groot gekozen dat in de gevaarlijke doorsnede c de magnetisatie juist de maximaal toelaatbare waarde kreeg. Daarna voerden wij, quasi als vanzelfsprekend, de onderstelling in dat de pool aan het eindvlak (doorsnede b) even dik is als in c. Dit is echter niet noodzakelijk: de polen zouden taps kunnen worden gemaakt. In b is de flux 20% kleiner dan in c, ten gevolge van de spreiding; bij een tapse vorm kan dus de magnetisatie, hoewel deze in b relatief groter wordt, toch in de gehele pool nog beneden het maximum blijven. Zou nu de tapse vorm, bij onveranderd gelaten inductie B_c in de doorsnede c (straal r_c), voordelig zijn? Stel even dat we de doorsnede b (straal r) verkleinen, uitgaande van de eerst gekozen waarde van $r = 0{,}9$ meter, en stel dan dat de spreidingsfactoren 1,25 en 1,5, die aangeven hoeveel de flux in doorsnede c van het staal groter is dan die in b resp. a, hierbij onveranderd blijven; dus $B_c r_c^2 = 1{,}25\ B_b r^2 = 1{,}5\ B_a r^2$. Voor de gewenste deeltjesenergie ligt $B_a r$ vast, dus wordt $B_c r_c^2 = \text{const.} \times r$, en men zou dus bij gegeven B_c de straal r_c (binnenstraal van de wikkeling!) evenredig met $\sqrt{r}$ kunnen verkleinen. Op deze wijze zouden we tot ongeveer $r = 0{,}6$ meter kunnen gaan (deze boven afgeleide grens van het „optimale gebied" van r wordt nl. door een tapse poolvorm niet noemenswaard beïnvloed); r_c mag dan dalen tot ca 0,75 meter. Dit zou een belangrijke besparing aan staal en koper opleveren (zie aan het begin van dit hoofdstuk), maar — in werkelijkheid zal de flux in b en a bij de tapse vorm relatief kleiner uitvallen, doordat bij deze vorm, en ook ten gevolge van de grotere gemiddelde inductie in de pool, de spreiding toeneemt. Er blijft dan zo weinig van het verwachte voordeel over, dat dit de complicaties van een constructie met tapse polen niet rechtvaardigt.

Wel kan het voordeel opleveren, een andere stilzwijgend gemaakte onderstelling los te laten, nl. dat het gehele magnetische circuit uit één staalsoort zou moeten worden gemaakt. We kunnen voor het meest kritieke stuk van de polen, ter plaatse van de doorsnede c, een duurdere staalsoort nemen, gelegeerd met cobalt, dat de verzadigingsmagnetisatie van het staal verhoogt. Dit zou een niet onaanzienlijke

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

besparing in ampèrewindingen hebben opgeleverd, die eventueel de hogere staalkosten meer dan gecompenseerd zou hebben, doch zoals gezegd beschikten we indertijd slechts over één staalsoort.

Natuurlijk is het nog voordeliger, een betere staalsoort, mits deze niet veel duurder is, voor de gehele magneet te gebruiken. Metingen aan een nieuw model, vrijwel gelijk aan het tweede hierboven genoemde maar vervaardigd uit een thans in aanmerking komende staalsoort, met iets hogere verzadiging, toonden dat hierbij voor $B = 1{,}4$ Wb/m² in de luchtspleet slechts 484 000 ampèrewindingen nodig zullen zijn (efficientie 84%!).

De uitgevoerde magneet

Dat het tweede model minder ampèrewindingen nodig had dan berekend was, is, behalve aan kleine afwijkingen van de onderstelde spreiding en andere onnauwkeurigheden in de berekening, vermoedelijk ook te danken aan een toevallig iets betere kwaliteit van het staal, speciaal in de polen. Natuurlijk moesten wij rekening houden met de mogelijkheid dat de staalkwaliteit ook wel iets slechter kon uitvallen, vooral daar het gloeien van grote blokken anders verloopt dan van kleine. Verder kunnen er door fouten in de afwerking spleetjes ontstaan, die de magnetische weerstand van het circuit verhogen. Om zulke tegenvallers op te vangen, werd bij de dimensionnering van de werkelijke magneet het kopervolume gekozen voor een 5% groter aantal ampèrewindingen dan uit het tweede model volgde. Dit bleek achteraf inderdaad zeer nodig te zijn, zoals uit de laatste kolom van tabel II is te zien.

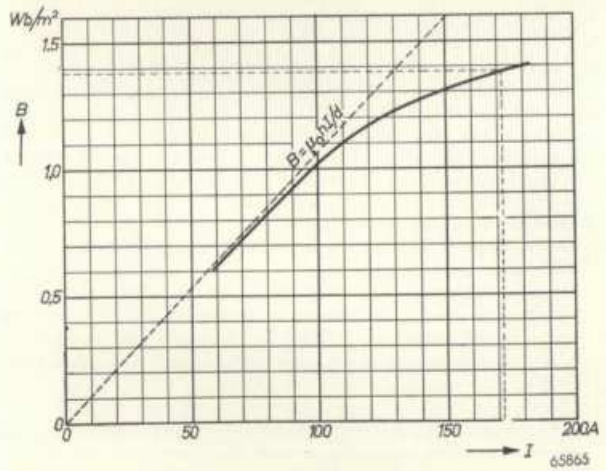


Fig. 3. Inductie B in het midden van het interferricum (doorsnede a in fig. 2), als functie van de bekrachtigingstroom I, bij de uitgevoerde magneet. De gestippelde rechte lijn, $B = \mu_0 nI/d$ (verg. 6), zouden wij krijgen als de magnetische weerstand (lijnintegraal $\int H\,dl$) van het staal te verwaarlozen was.

Fig. 3 geeft de verkregen inductie B in het interferricum van de uitgevoerde magneet (dus eigenlijk: B_a) als functie van de bekrachtigingstroom I. De spoelen werden uitgevoerd met in totaal 3048 windingen, en hiermee wordt de inductie $B = 1{,}35$ Wb/m² bereikt bij $I = 163$ A, zodat $nI = 497\,000$. De maatregelen die genomen moeten worden voor het verkrijgen van een geschikte radiale veldverdeling in de luchtspleet (het „bijwerken" van het veld of „shimming", zie hieronder) hebben een daling van de inductie in de as ten gevolge. Dit effect werd echter ruimschoots gecompenseerd doordat het mogelijk bleek de bekrachtigingstroom, zonder dat de spoelen, met de beschikbare koelcapaciteit, al te heet werden, nog wat hoger op te voeren. Zodoende kunnen we nog goed werken met een axiale inductie $B = 1{,}38$ Wb/m². Deze waarde werd dan ook ten grondslag gelegd aan de vaststelling van de oscillatorfrequentie, die immers zo moet worden gekozen dat de deuteronen in resonantie met het electrisch veld komen: $\omega = eB/m$. Met de sterkere bekrachtiging kon een deeltjesenergie van 28 MeV worden bereikt, in plaats van de 25 MeV waarvoor het apparaat werd ontworpen (zie verg. 1).

Om de resonantie te handhaven, moet B en dus de bekrachtigingstroom zeer goed constant worden gehouden. De stabilisatie-inrichting die hiervoor werd gemaakt, hopen wij in een later artikel te beschrijven, evenals de beveiligingsinstallatie die nodig was voor het geval van een plotseling verbreken van de bekrachtigingstroom: zonder speciale maatregelen zou het snel verdwijnen van de enorme magnetische flux reusachtige overspanningen in de wikkeling kunnen doen ontstaan.

Het „bijwerken" van het veld („shimming")

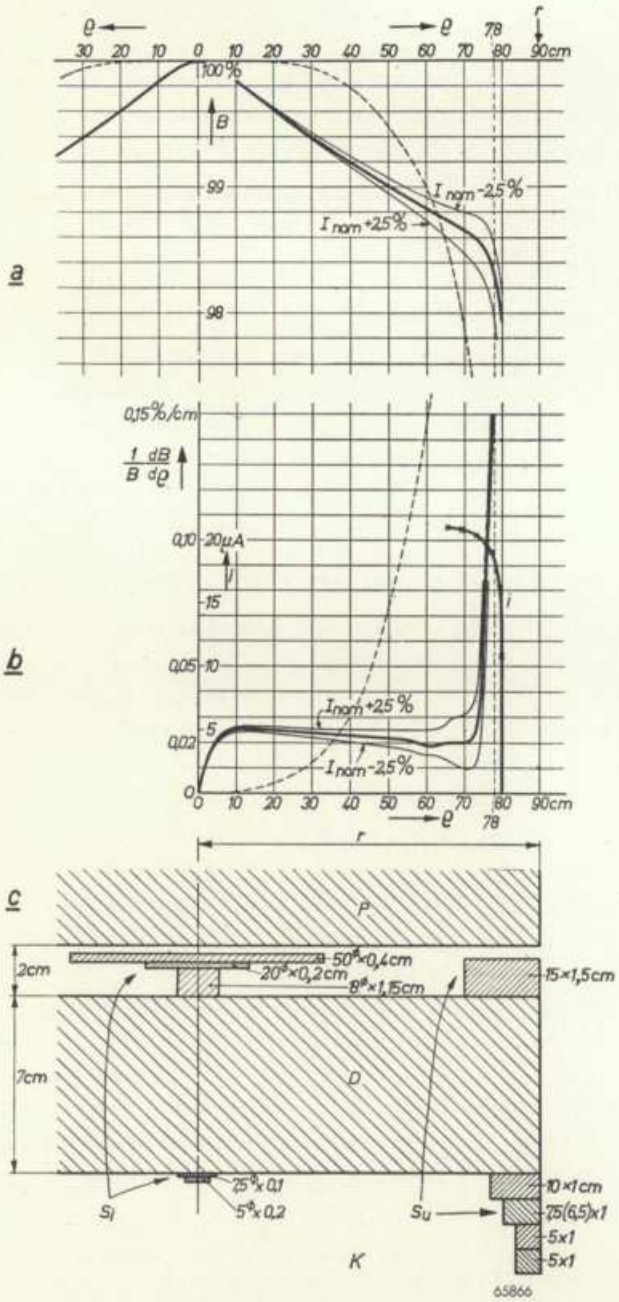
De werking van een cyclotron of synchrocyclotron wordt pas goed mogelijk gemaakt door de focussering van de deeltjesbundel in het middenvlak van het interferricum. Dit is indertijd uitvoerig in dit tijdschrift besproken [7]). Voor de focussering moet het magnetische veld onder en boven het middenvlak een radiale component hebben, zodanig dat een tonvormig krachtlijnenverloop resulteert. Een dergelijk veld krijgt men van nature ten gevolge van de spreiding; de verticale component B van de inductie neemt daardoor met toenemende straal ϱ af, zie de gestippelde kromme in *fig. 4a*. De relatieve gradient $(1/B)\mathrm{d}B/\mathrm{d}\varrho$, die als maat voor de focussering kan dienen, is blijkens deze kromme normaliter bij kleine ϱ zeer klein, te klein voor de gewenste focusserende werking, en bij grote ϱ neemt hij snel toe, zo snel dat we een

[7]) W. de Groot, Cyclotron en synchrocyclotron, Philips techn. T. **12**, 65-72, 1950 (No. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

onaangenaam grote frequentievariatie van de oscillator nodig zouden hebben om de dalende hoeksnelheid der in dit gebied gekomen deeltjes bij te houden, terwijl wij toch nog genoegen zouden moeten nemen met een relatief kleine maximale straal R van de baan (kleine eindenergie der deeltjes). Door het aanbrengen van geschikt geprofileerde stalen correctieplaten en correctieringen („shims") op de poolvlakken kan men nu het veldverloop $B(\varrho)$ zo beïnvloeden dat de waarden van de gradient beter aan ons doel beantwoorden. Wij streefden er naar de gradient gemiddeld 0,02% per cm te maken en deze zoveel mogelijk van de as tot aan de rand der polen constant te houden. De correctieplaten en ringen, waarmee dit bereikt werd en waarvan de nodige afmetingen empirisch moesten worden bepaald, zijn in fig. 4c getekend (niet op schaal); het resultaat van het bijwerken wordt door de getrokken lijnen in fig. 4a en b aangegeven. Men ziet dat de gradient tot een straal van 75 cm practisch constant is, daarna treedt een snelle toeneming op. Dit betekent dat de intensiteit van de deeltjesbundel, indien we de vangschijf die deze opvangt successievelijk plaatsen bij grotere ϱ, van $\varrho \approx 75$ cm af snel zal gaan dalen. In fig. 4b is de gemeten bundelstroomsterkte i als functie van ϱ mede uitgezet. Men ziet dat de grootste bruikbare straal op $R = 78$ cm kan worden gesteld. R is dus 86,5% van de straal $r = 90$ cm van de polen, in goede overeenstemming met de onderstelling die in het begin van dit artikel werd gemaakt ($R = 0{,}85\ r$). Bij $R = 78$ cm is B ongeveer 1,7% kleiner dan in de as, dus 1,355 Wb/m², zodat inderdaad de maximale deeltjesenergie $T = 28$ MeV wordt bereikt. De grens $R =$ 78 cm is natuurlijk niet scherp. Nemen we met een kleinere bundelintensiteit genoegen, dan kunnen we een nog iets grotere energie dan 28 MeV bereiken.



De bruikbare straal R zou nog iets kunnen worden vergroot door de correctieringen dikker te maken, waardoor de gradient tot een grotere straal klein zou blijven; dit was echter in ons geval niet mogelijk in verband met de nodige ruimte voor de constructie van de versnellingskamer, de Dee's en de hulpapparaten.

Het veldverloop $B(\varrho)$ is, ten gevolge van de meerdere of mindere verzadiging in sommige correctieplaten of ringen, afhankelijk van de bekrachtigingstroom I, zoals uit de curven in fig. 4a blijkt. Bij te kleine I zien we de gradient naar de rand

---

Fig. 4. Het „bijwerken" van het magneetveld („shimming"), voor het focusseren van de deeltjes in het middenvlak van het interferricum.

a) Verloop van de verticale component(procentueel) van de inductie B in het middenvlak, als functie van de afstand ϱ tot de as. Gestippeld: vóór het bijwerken. Getrokken: nà het bijwerken. Dun getrokken: bij 2,5% sterkere of zwakkere bekrachtiging dan normaal.

b) De gradient $(1/B)\mathrm{d}B/\mathrm{d}\varrho$ van de in (a) aangegeven krommen. Tevens is hier uitgezet de gemeten stroomsterkte i (microampères) van de opgevangen deeltjesbundel, als functie van de afstand ϱ van de vangschijf tot de as. Van $\varrho = 78$ cm af gaat de bundelintensiteit sterk dalen. De inductie is hier $B = 1{,}355$ Wb/m², waaruit volgt een maximale deuteronen-energie van 28 MeV.

c) Doorsnede van het einde van een pool met de daar aangebrachte stalen correctieplaten en correctieringen. (Bij de andere pool is de configuratie dezelfde.) De hoogte-afmetingen zijn terwille van de duidelijkheid op 10 maal grotere schaal getekend dan de breedte-afmetingen. P is de eigenlijke pool, D het (wat staaldikte betreft) daarbij te tellen deksel van de versnellingskamer K (zie fig. 1); de tussenruimte van 2 cm — die globaal 40 000 ampèrewindingen kost! — was noodzakelijk om de versnellingskamer op haar plaats te kunnen brengen.

Door de combinatie van centrale correctieplaten s_i wordt er voor gezorgd dat reeds op enkele cm van de as de gradient merkbaar van nul verschilt, terwijl hij op 5 cm al de waarde van 0,02%/cm bereikt. Deze waarde behoudt hij dan tot op ongeveer 75 cm van de as, dank zij de correctieringen s_u.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

toe eerst vrij sterk dalen (fig. 4*b*), hij kan er zelfs even negatief worden, wat onmiddellijk tot defocussering zou voeren en de bundel zou doen verdwijnen. De bekrachtigingstroom moet dus zorgvuldig op de juiste waarde worden ingesteld. Voor eventuele variaties tijdens het bedrijf behoeven we ons niet bezorgd te maken, daar, zoals reeds werd vermeld, de stroom I met het oog op handhaving van de resonantie toch zeer goed constant wordt gehouden (op 0,06%).

Interessant is nog de straal waar de uitdrukking $(\varrho/B)\mathrm{d}B/\mathrm{d}\varrho$ de waarde 0,2 bereikt. Hier geraken nl. de verticale slingeringen van de rondcirkelende deeltjes in „resonantie" met de radiale slingeringen, waardoor — indien het gebied met de kritieke waarde niet snel gepasseerd wordt — defocussering optreedt (zie [7]). In ons geval is bij $\varrho = 78$ cm de gradient $(1/B)\mathrm{d}B/\mathrm{d}\varrho \approx 0{,}15\%/\mathrm{cm}$, dus de genoemde uitdrukking bedraagt ongeveer 0,12. Globaal kan men derhalve zeggen dat de grens die aan de bereikbare energie wordt gesteld door dit defocusseringseffect in ons geval vrijwel samenvalt met de grens die gesteld wordt doordat de frequentievariatie van de modulator niet meer voldoende is om de steile afneming van B te compenseren. De coïncidentie van de beide grenzen waarborgt dat zowel van het magneetveld als van de modulator ten volle gebruik wordt gemaakt.

De aanwezigheid van de verticale delen van het juk heeft, als men geen maatregelen neemt, een azimuthale variatie van het veld in het interferricum ten gevolge. Deze asymmetrie kon voldoende worden gecorrigeerd door de correctiering van nominaal 7,5 cm breedte op sommige plaatsen wat smaller te maken, tot 6,5 cm toe.

Mechanische opbouw van het magnetisch circuit

Aan de afgeleide dimensies van de magneet beantwoordt een totaal gewicht aan staal van 200 ton. Het staal kon slechts geleverd worden in blokken van hoogstens 15 ton. Het juk werd daarom opgebouwd uit 2 × 4 liggende en 2 × 4 staande blokken. De vier onderste liggers werden op twee in een betonnen fundament ingegoten stalen balken gelegd en door vulplaatjes precies even hoog en horizontaal geplaatst. De blokken voor de verticale jukdelen werden los hierop geplaatst en de bovenste liggers weer daar overheen gelegd (*fig.* 5). Nergens werden bouten toegepast voor onderlinge verbinding der blokken: het gewicht houdt de blokken voldoende zeker op hun plaats, en het opheffen van eventuele luchtspleten tussen de delen (zie ook hieronder) door deze op elkaar aan te trekken kan men zich gevoegelijk besparen, daar de magnetische krachten dit beter bezorgen dan men met bouten zou kunnen doen. Ieder van de polen werd in twee schijven verdeeld, om de spoelen op hun plaats te kunnen brengen (zie hieronder). De schijven van de onderste pool liggen weer los, behalve dat iedere schijf door drie pennen

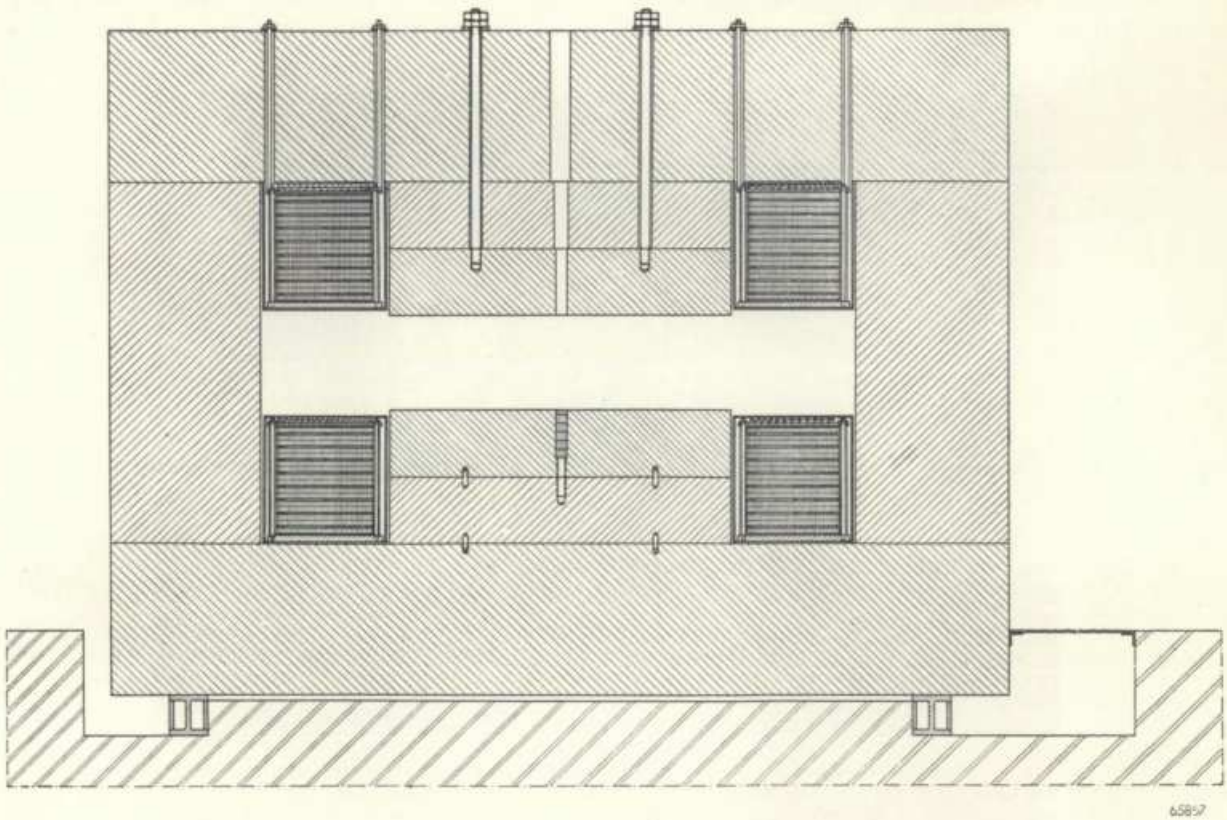


Fig. 5. Het hier in overlangse doorsnede getekende juk is opgebouwd uit in totaal 2 × 4 horizontale en 2×4 verticale staalblokken. Elke pool is samengesteld uit twee schijven. Het gat in de bovenpool, dat evenals dat in de onderpool voor het in bedrijf zetten gedeeltelijk werd gedicht, dient om de montage van bovenpool en versnellingskamer mogelijk te maken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

voor zijdelingse verschuiving wordt behoed. De schijven van de bovenste pool worden door bouten gedragen. Hoewel de polen elkaar met een kracht van circa 200 ton aantrekken, behoeven de bouten slechts voor het dragen van het gewicht van de bovenpool berekend te zijn. De magnetische flux, die de kracht op een doorsnede van het circuit bepaalt, is immers in doorsnede *c* (fig. 2) aanmerkelijk groter dan in de eindvlakken van de polen, doorsnede *b*. De bovenpool wordt dus na inschakelen van de bekrachtiging met een nog grotere kracht dan 200 ton tegen de bovenste jukbalken aangetrokken!

Door de aantrekking tussen de polen, die natuurlijk als onderlinge aantrekking op de onderste en bovenste balken wordt overgebracht, buigen deze balken iets door en men zou kunnen vrezen, dat de verticale balken daardoor zijdelings zouden worden weggedrukt. De flux door de doorsnede *f* (fig. 2) is echter zo groot dat de balken daar krachtig tezamen worden gehouden: de liggers buigen zodanig door dat hun hartlijn een buigpunt krijgt tussen de polen en de verticale jukdelen.

Constructie van de spoelen

Uit het aantal ampèrewindingen $nI = 497\,000$ en de hierboven reeds vermelde gegevens van de generator kon het nodige aantal windingen en de nodige koperdoorsnede worden afgeleid. Daarbij moest natuurlijk de soortelijke weerstand van koper bij de bedrijfstemperatuur (ca 45 °C) in rekening worden gebracht. We kwamen zo tot het reeds genoemde aantal van ruim 3000 windingen.

Om gemakkelijk en met weinig kracht te kunnen wikkelen, werd koperband gebruikt, met een profiel 0,5 × 3 cm². Dit band kon worden geleverd in rollen, met een lengte per rol van slechts 60 m. Voor de totale bandlengte, die 24 km bedraagt (gewicht ca 30 ton), moesten dus 400 lassen worden gemaakt. Het lassen werd zoveel mogelijk gemechaniseerd. De lassen werden met zilver gemaakt en stuk voor stuk met 500 kg trekkracht beproefd, om generlei risico van breuk na de montage te nemen. Op een horizontale draaiende tafel werd het band opgerold tot een soort „pannekoeken" van elk ca 100 windingen. Bij het oprollen werden twee lagen speciaal sterk papier van elk 250 μ dikte meegewikkeld als isolatie; zie *fig. 6*.

Elk der beide spoelen wordt gevormd door 16 op elkaar gestapelde pannekoeken. Deze liggen in paren; de twee pannekoeken van een paar zijn van elkaar geïsoleerd door twee laagjes hard papier van elk 1 mm dik. De paren zijn van elkaar geïsoleerd

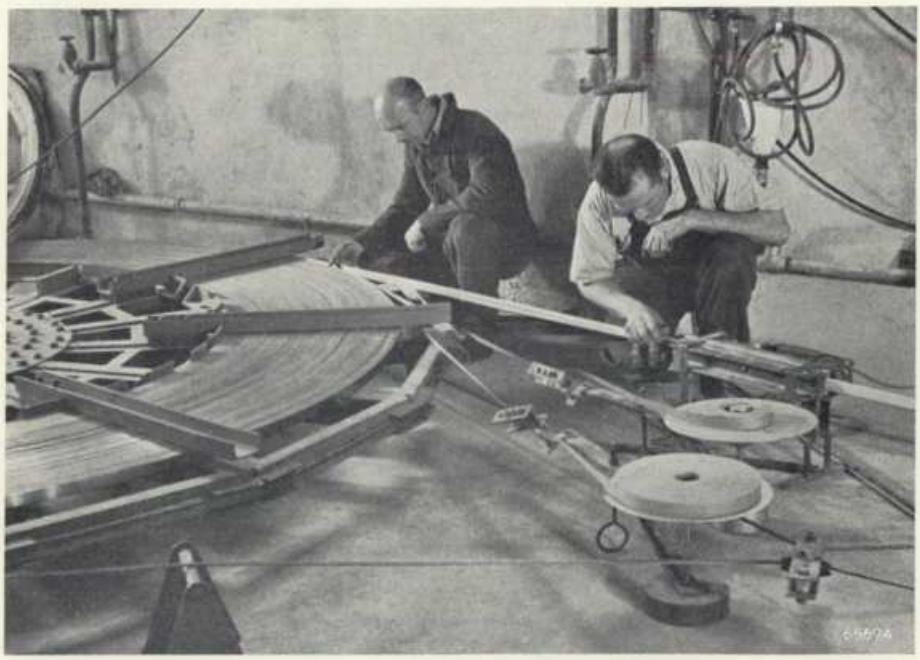


Fig. 6. Het wikkelen van een der 2 × 16 „pannekoeken", waaruit de bekrachtigingswikkeling werd opgebouwd. De pannekoek wordt verkregen door een stuk koperband van ongeveer 750 m lang (doorsnede 3 × 0,5 cm²) op een horizontale draaiende tafel op te rollen, waarbij twee lagen papier, aflopend van de twee rollen rechts op de voorgrond, worden meegewikkeld als isolatie tussen de afzonderlijke windingen. De tafel werd rondgedraaid door een staaldraad om de buitenomtrek te wikkelen (zie vooraan op de foto) en deze draad met een electrische lier weer af te wikkelen. Het koperband werd strak gehouden door het te laten glijden door een klemblok met eikenhouten voering (trekkracht bij het wikkelen 500 kg), dat achter de rollen papier zichtbaar is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

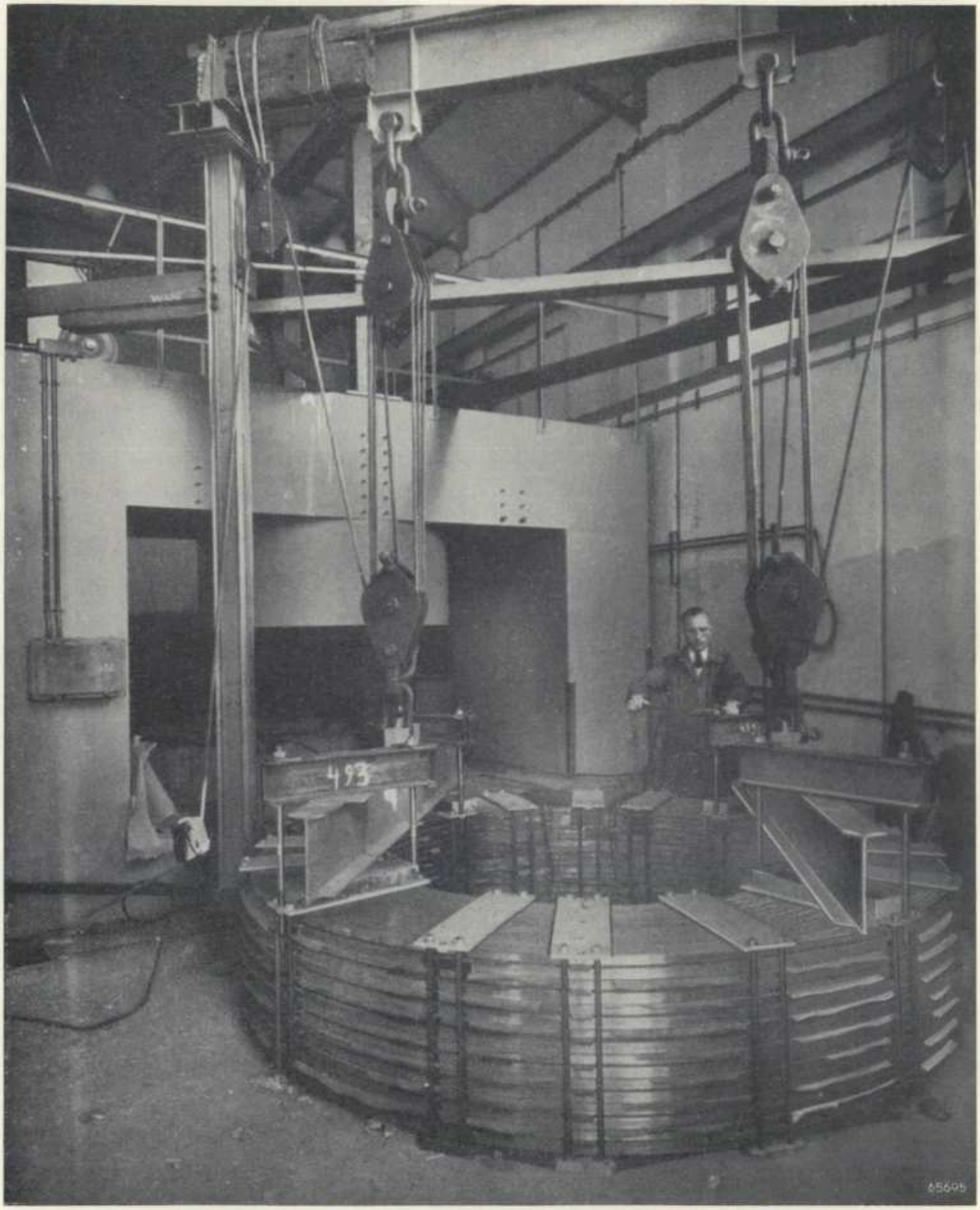


Fig. 7. Geheel gemonteerde spoel, gereed om in de tank te worden geplaatst (fig. 9) en dan rondom de bovenpool van de magneet te worden gehesen. — Zie ook de titelfoto, waarin beide spoelen reeds op hun plaats zijn gebracht en alleen de bovenste helft van de onderpool nog ingeschoven en dan neergelaten moet worden.

door tussengelegde stukken hard weefsel van 10 mm dikte, die zo gerangschikt zijn dat zij een zigzagvormige weg vrij laten voor het passeren van olie voor de koeling (zie hieronder, fig. 8). De pannekoeken en tussenplaten van elke spoel werden met behulp van een reeks stalen platen en trekstangen op elkaar geklemd. Aldus werd een stevige ring verkregen (*fig.* 7). De onderspoel werd neergelegd rondom de onderpool en rust op de onderste liggers van het juk en enige steunkolommen. De

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bovenspoel werd opgehangen aan 16 stalen stangen, die in de (plaatselijk verdikte) klemplaten zijn geschroefd en die door uitsparingen in de bovenbalken van het juk resp. door een zestal aan het juk geschroefde consoles lopen. De stangen behoeven niet meer te dragen dan het gewicht van de spoel, daar de ponderomotorische krachten van het buiten het staal aanwezige magnetische spreidingsveld de bovenspoel omhoog drukken, de onderspoel omlaag.

De koeling van de spoelen

Het afvoeren van de in het koper ontwikkelde warmte (ruim 80 kW) geschiedt door stromend water, waarbij echter als tussenschakel terwille van de isolatie van de blanke windingen, stromende olie is gebruikt. Elke spoel staat in een los er om heen sluitende ringvormige tank, waaraan op twee diametraal tegenover elkaar gelegen plaatsen de olie wordt toegevoerd. Via twee daar tussenin gelegen overlopen loopt de olie weer af, na door zigzagvormige kanalen langs de pannekoeken gestroomd te zijn (*fig. 8*). De olie in de tanks staat niet onder druk, teneinde de kans op lekken zoveel mogelijk uit te sluiten. Ze wordt in beweging gehouden door een hoogteverschil van slechts enkele centimeters tussen in- en uitlaatniveau in de tanks. Met behulp van vulhout langs de omtrek, dat tevens dient om „werken" van de wikkelingen ten gevolge van ponderomotorische krachten tegen te gaan, wordt voorkomen dat de olie buiten de kanalen om vloeit. De tanks, die om de spoelen werden geschoven alvorens deze op hun plaats werden gezet, zijn mechanisch in het geheel niet belast; zo is weer het gevaar van olielekken door eventuele scheurtjes minimaal gemaakt, terwijl de stalen tankwand toch zo dun kon worden uitgevoerd dat hij geen noemenswaardige magnetische flux opzuigt (*fig. 9*). Van boven

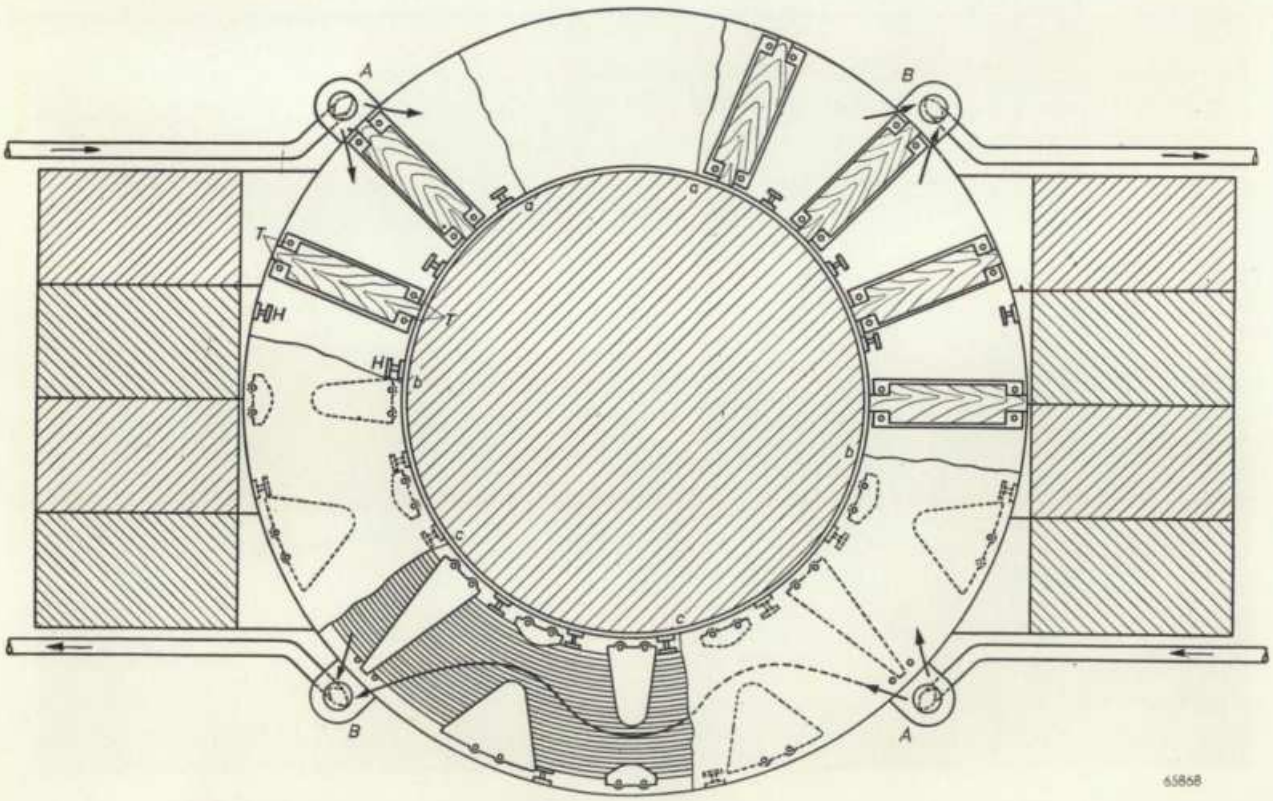


Fig. 8. Bovenaanzicht van een der spoelen, op haar plaats gebracht in de magneet. Van *a* tot *b* is het deksel van de spoeltank verwijderd, zodat men de houten planken ziet die de druk van de bovenspoel tegen haar tankdeksel opnemen resp. die het tankdeksel van de onderspoel steunen; ook ziet men hier de bovenste van de reeks stalen platen waarmee de 16 pannekoeken op elkaar worden geperst; *T* zijn de stalen trekstangen waarmee dit geschiedt. Van *b* tot *c* kijkt men op een isolerende laag op de bovenste pannekoek, van *c* tot *c* is deze bovenste pannekoek weggenomen, zodat men de windingen van de daaronder gelegen pannekoek ziet en de tongvormige stukken hard weefsel die de koelolie in een zigzagweg tussen de twee pannekoeken door leiden. Bij *A*,*A* wordt de olie aan de tank toegevoerd (de 15 boven elkaar gelegen oliewegen tussen de 16 pannekoeken zijn parallelgeschakeld), bij *B*,*B* weer afgevoerd, zodat de olie slechts een kwart van de omtrek van een pannekoek doorloopt. *H* is het vulhout tussen de pannekoeken en de tankwand.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

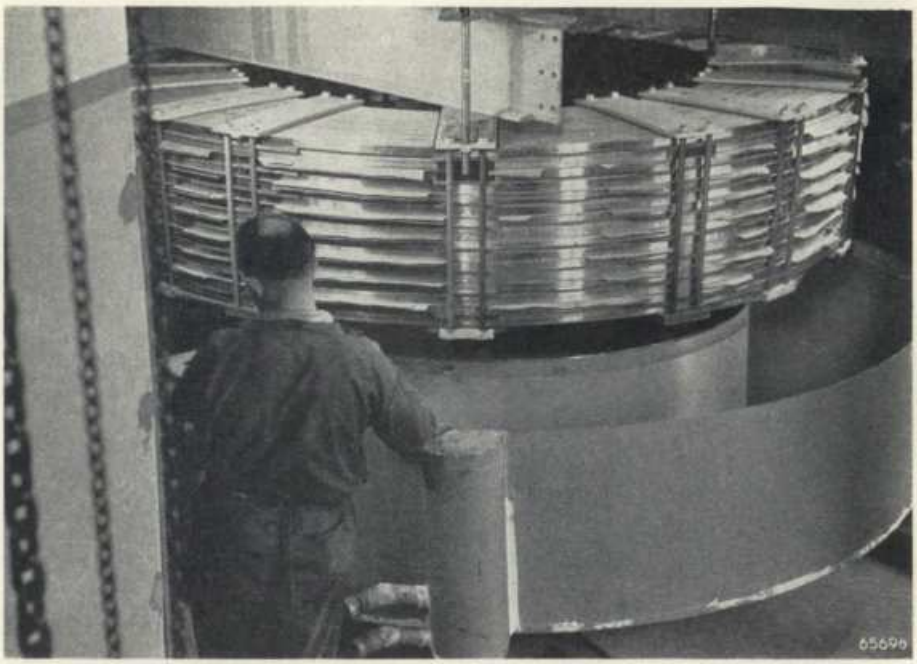


Fig. 9. Spoel, bestaande uit 16 op elkaar geperste pannekoeken, gereed om in de ringvormige tank te worden geplaatst.

zijn de tanks bedekt met licht gegolfd blik (om mechanische spanningen te vermijden) en dichtgesoldeerd met tin. De warme, uit de tanks afvloeiende olie stroomt naar een onder de vloer gelegen verzameltank. Van hieruit wordt hij met behulp van een pomp door een stel van 10 parallelle koperen pijpen geperst, waaromheen in stalen buizen koelwater stroomt (*fig. 10*). Daarna komt de olie weer in de spoeltanks. Het waterverbruik is 100 l/min, de olie stroomt door koelaggregaat en

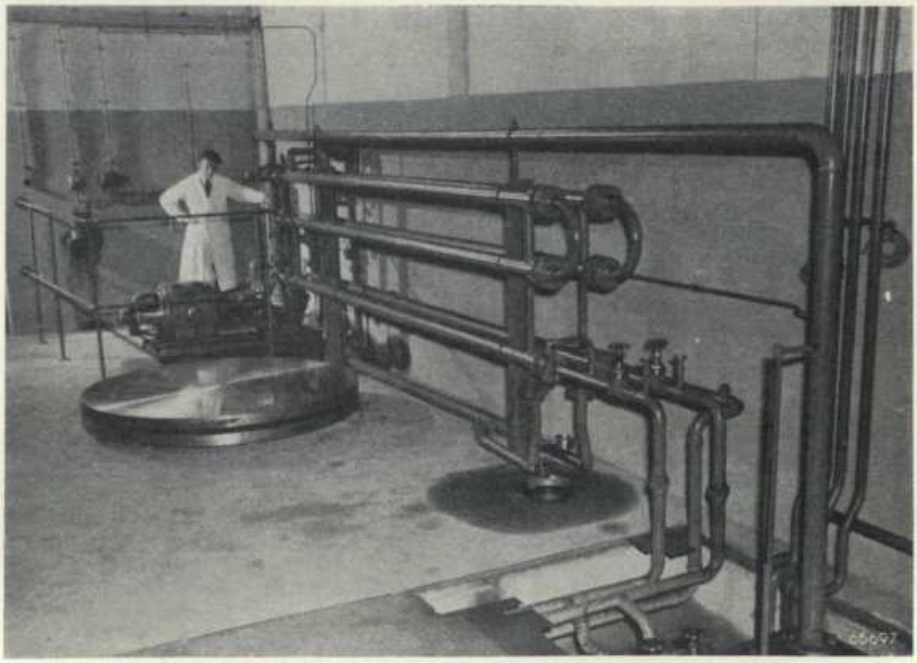


Fig. 10.Koelaggregaat. Rechts op de voorgrond de ondergrondse verzameltank voor de warme, uit de spoeltanks komende olie. De olie wordt uit de verzameltank met behulp van een pomp (op de achtergrond zichtbaar) geperst door 10 parallel geschakelde koperen pijpen van 2,2 cm diameter en 12 m lengte. Deze pijpen zijn 5 aan 5 in twee stalen buizen van 9 cm diameter gemonteerd, waarin koelwater langs de oliepijpen stroomt (100 l/min). Op de foto ziet men in het midden deze twee buizen, die voor plaatsbesparing ieder in drie horizontaal boven elkaar gelegen stukken zijn gevouwen. Na het koelaggregaat doorlopen te hebben, stroomt de olie weer in de spoeltanks.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

spoeltanks met een snelheid van 300 l/min. Door te zorgen voor een turbulente stroming van beide media in het koelaggregaat is een goede warmte-overdracht gewaarborgd. Het temperatuurverschil tussen de in en uit de spoeltanks stromende olie bedraagt slechts enkele graden, doordat alle olie-kanalen parallel staan en de olie slechts een kwart spoelomtrek doorloopt. Zulk een korte olieweg was nodig omdat wij anders niet met een zo gering druk-verschil tussen in- en uitlaat zouden zijn toegekomen.

De gemiddelde olietemperatuur stelt zich op een vrij hoge waarde in (ca 45 °C). Het evenwicht wordt bepaald o.a. door de afneming van de vis-cositeit van de olie met toenemende temperatuur, waarmee een toeneming van de stroomsnelheid gepaard gaat, en door de toeneming van de warmte-overdracht aan het water bij toenemende olie-temperatuur. Aangezien voor de dimensionnering van de magneet de te verwachten temperatuur van de spoelen al bekend moest zijn, hebben we tevoren dit evenwicht door modelproeven onder-zocht, waarbij in het bijzonder de stromings-weerstand van de kanalen werd bepaald als-mede de hoeveelheid warmte die kan worden afgevoerd bij verschillende stromingsnelheden van de olie.

Dank zij de betrekkelijk hoge olietemperatuur draagt ook de warmtestraling van de spoeltanks, met hun grote oppervlak, in niet onbelangrijke mate tot de warmte-afvoer bij.

Samenvatting. Bij het ontwerpen van de grote magneet van het Philips-synchrocyclotron te Amsterdam werd uitgegaan van een gewenste eindenergie van 25 millioen electronvolt voor de te versnellen deuteronen en van een lengte van het interferricum van 36 cm. Verder stond vast dat het vermogen voor de bekrachtiging ongeveer 80 kW mocht bedragen, en er was een staalsoort met een bepaalde magnetisatie-kromme beschikbaar. Het magnetisch circuit — waarvan de algemene vorm door allerlei technische overwegingen wordt voorgeschreven — moest nu zo worden gedimensionneerd dat de totale kosten voor koper en staal minimaal werden. Deze gunstigste dimensionnering kan niet exact worden af-geleid doch moet door proefberekeningen en metingen aan proefmodellen worden benaderd. De belangrijkste overwegin-gen die de gang van het ontwerp bepalen, worden in dit artikel uiteengezet. Bij de ten slotte gekozen dimensies, met een pooldiameter van 1,80 m, een juklengte van 4,70 m en een jukhoogte van 3,50 m, zijn 497 000 ampèrewindingen nodig om in de as van het interferricum een magnetische inductie van 1,35 Wb/m² op te wekken; 76% van deze ampère-windingen zijn nodig voor het overwinnen van de magnetische weerstand van het interferricum, de rest is vereist voor de weerstand van het staalcircuit. Het totale gewicht aan staal van de uitgevoerde magneet is 200 ton, aan koper 30 ton. De magneet is opgebouwd uit 16 stalen blokken en 4 stalen poolstukken, die, met uitzondering van de aan bouten hangen-de bovenste pool, zonder enigerlei bevestiging aan en op elkaar zijn gevoegd. De wikkeling, bestaande uit twee gedeelten, is berekend voor een totale spanning van ongeveer 500 volt (weerstand ca 3 ohm, totaal aantal windingen ruim 3000). Elk gedeelte is opgebouwd uit 16 „pannekoeken" van opge-wikkeld koperband met papier als isolatie. De pannekoeken worden gekoeld door er langs stromende olie; de rondgepompte olie geeft de opgenomen warmte in een koelaggregaat aan stromend water af (waterverbruik 100 l/min). Het bleek met de uitgevoerde koelinstallatie mogelijk de magneet nog iets sterker te bekrachtigen (temperatuur van de wikkeling ca 45 °C), zodat normaal met een inductie van 1,38 in plaats van 1,35 Wb/m² wordt gewerkt. In het artikel worden ook de maat-regelen beschreven waardoor een voor stabilisatie van de deeltjesbanen geschikt radiaal verloop van de inductie in het interferricum wordt bereikt. De grootste bruikbare baan blijkt een straal van 78 cm te hebben. Hierdoor en door de iets grotere inductie, kunnen deuteronen van 28 in plaats van 25 MeV met dit synchrocyclotron worden geproduceerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

BOEKBESPREKING

Fluorescentieverlichting, een overzicht van de wetenschappelijk-technische grondslagen en toepassingen van de fluorescentielampen en hun accessoires, onder redactie van Prof. Dr. C. Zwikker, 262 blz., 173 illustraties. — Philips Technische Bibliotheek — Meulenhoff & Co. N.V., Amsterdam 1950.

De snelle opkomst van de fluorescentielamp kan vergeleken worden met het succes van de metaaldraadlamp (1907) en met dat van de gasvullingsgloeilamp (1913).

Steeds ging het om een nieuwe lichtbron, waarvan de efficientie belangrijk beter was dan van de voorgaande, en om een lichtbron die, ten gevolge van de lichtkleur, algemeen bruikbaar was.

Het is kenmerkend voor de snelle inburgering van de buisvormige fluorescentielamp, dat thans vrijwel alle belangrijke nieuwe verlichtingsinstallaties in winkels, restaurants, kantoren en fabrieken met deze fluorescentielampen worden uitgevoerd.

Toch is de overgang naar deze nieuwe lichtbron niet zo eenvoudig geweest als die van de ene gloeilamp naar de andere.

De langgestrekte vorm stelde volkomen nieuwe eisen aan de armaturen. De onmisbare voorschakelapparatuur moest ondergebracht worden en wel zo, dat de minste hinder daarvan werd ondervonden. Het verwisselen van een kleinere lamp tegen een grotere, bij de gloeilamp het gebruikelijke middel om de verlichting te verbeteren, was bij de fluorescentielamp niet mogelijk, zodat hoge eisen aan de nauwkeurigheid van het verlichtingsproject worden gesteld. Kortom, met de ontwikkeling van deze nieuwe lamp was men er geenszins. Ook ten aanzien van de armaturen en de verlichtingsystemen moesten nieuwe wegen gezocht worden.

Wie fluorescentielampen gaat toepassen zonder zich van te voren hiervan op de hoogte gesteld te hebben, riskeert tegenvallers.

Daarom is het verschijnen van dit boek zo bijzonder toe te juichen. Onder leiding van Prof. Dr. C. Zwikker als redacteur heeft een negental auteurs, allen technische of wetenschappelijke medewerkers van Philips, de verschillende aspecten van de fluorescentieverlichting behandeld. Hier volgt een overzicht hunner bijdragen:

Dr. J. L. Ouweltjes:	Luminescentie, fluorescentie en fosforescentie en de luminescerende stoffen.
Dr. A. A. Kruithof:	Kleur van het licht en kleurweergave.
Dr. W. Elenbaas:	Gasontladingen, lampconstructie en rendementsbeschouwingen.
Drs. J. Funke:	Lamptypen, starters, schakelingen.
Th. Hehenkamp:	Voorschakelapparaten.
Ir. L. M. C. Touw:	Armaturen voor fluorescentielampen.
Dr. D. Vermeulen:	Beginselen van de verlichtingstechniek.
Ir. L. C. Kalff:	Toepassing van fluorescentielampen.
Dr. R. v. d. Veen:	Gebruik van fluorescentielampen in land- en tuinbouw.

Het boek is ruim en goed geïllustreerd, waarbij speciaal vermeld moge worden een afbeelding van de kleurendriehoek en de in kleuren uitgevoerde energiebalans van de fluorescentielamp op blz. 83.

Voor degenen die zich slechts voor een gedeelte van het behandelde gebied interesseren, bewijst een uitvoerig register goede diensten.

Dit boek is een bijzonder geslaagd voorbeeld van teamwork. Er bestaat een goed evenwicht tussen de verschillende hoofdstukken. Storende overlappingen en herhalingen zijn vermeden. Het boek geeft even goed beknopte theoretische uiteenzettingen als practische wenken. Zowel de ingenieur als de installateur, de architect en de physicus kunnen het gebruiken om zich op de hoogte te stellen van de tegenwoordige stand van de fluorescentieverlichting.

Wij menen onze waardering voor dit boek het best te kunnen uitdrukken in de opmerking, dat wij het betreuren, dat een dergelijk boek over de gasvullings-gloeilamp nog altijd niet verschenen is.

N. A. HALBERTSMA.

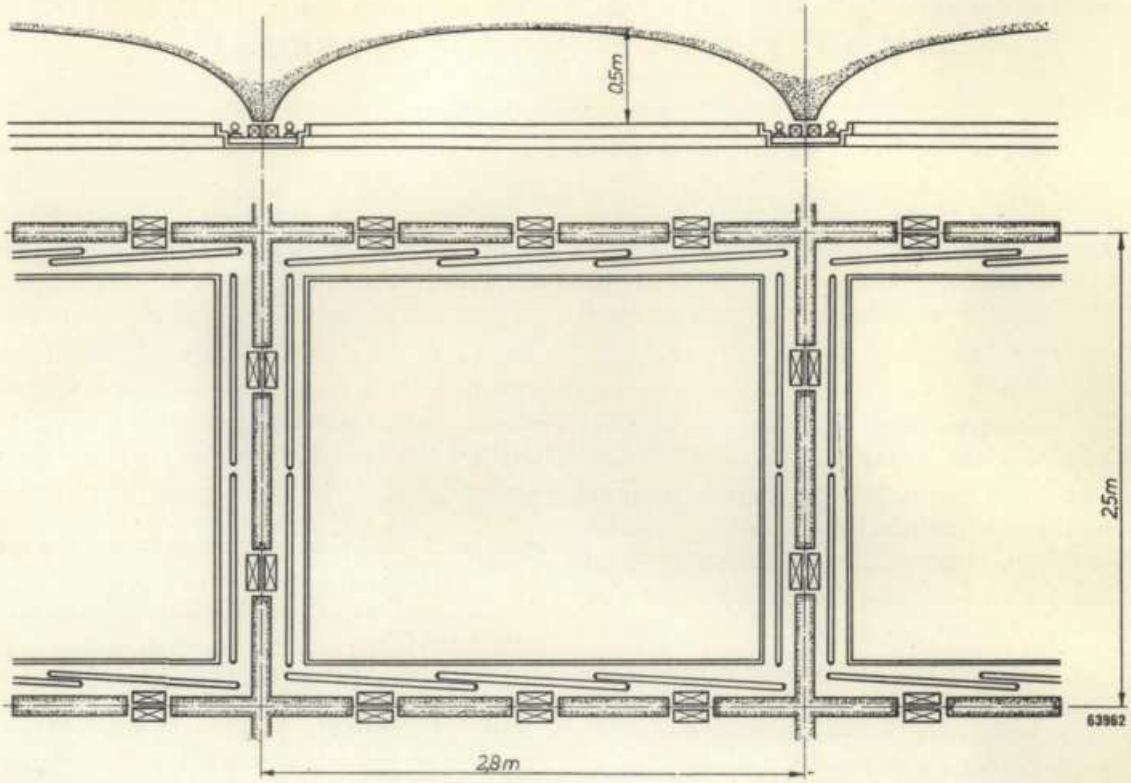
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE GROTE ZAAL VAN HET STATION IN LE HAVRE

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Deze zaal, 1600 m² groot en gelegen tussen het perron van het spoorwegstation en de kade waar de oceaanstomers aanleggen, wordt uitsluitend indirect verlicht door Philips fluorescentiebuizen.

Het middelste deel van het plafond bestaat uit 96 cassetten met gewelfd bovenvlak van 2,5 × 2,8 m². Langs de randen van elke cassette, onzichtbaar uit de zaal, zijn 10 fluorescentiebuizen van 25 W aangebracht, op de wijze als in bovenstaande schematische tekening is aangegeven. Door de vorm van de matwit gekleurde welving en de opstelling der buizen wordt een zeer gelijkmatige lichtverdeling verkregen. De verlichtingsterkte in de zaal bedraagt gemiddeld 150 lux, het verlichtingsrendement 20%.

Boven de lange zijde van de zaal, buiten de pilaren, bevinden zich in het plafond nog ronde en vierkante cassetten, op dezelfde manier verlicht met vier fluorescentiebuizen.

Het geheel wekt de indruk alsof men zich in een grote pergola bevindt en door open vakken de hemel ziet.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voorzover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

1933: R. Loosjes, H. J. Vink en C. G. J. Jansen: The potential distribution in pulsed oxide-coated cathodes and its consequences for the velocity distribution of the emitted electrons (J. appl. Phys. **21**, 350-351, 1950, No. 4).

Vroegere onderzoekingen (zie deze overzichten No's **R 124** en **1910**) hebben aangetoond, dat een potentiaalverschil van ca 200 V kan bestaan in de oxydelaag van een oxydekathode bij een stroomdichtheid van 10 A/cm² en dat dit potentiaalverschil is geconcentreerd nabij het buitenoppervlak van de oxydelaag. Ten gevolge hiervan is te verwachten, dat de spreiding in de snelheden van de geëmitteerde electronen veel groter is dan overeenkomt met de formule van Maxwell. Dit is inderdaad het geval; bovendien is het snelheidspectrum van de electrostatisch afgebogen electronen niet continu, maar vertoont het twee (soms drie) „lijnen"; de spreiding in de energie der electronen bedroeg 230 eV bij $V_a = 860$ V, $I_a = 14$ A/cm² en $T = 942$ °C.

1934: W. de Groot: The radiation constants and the light equivalent of energy (Physica **16**, 419-420, 1950, No. 4).

Zoals door Hoffmann is opgemerkt, verdwijnen de discrepanties tussen de experimentele en de theoretische waarden van de constante van Stefan-Boltzmann (σ) en de constante c_2 van Planck gelijktijdig, als men aanneemt dat de waarde van het smeltpunt van goud enkele graden hoger is dan de internationaal aangenomen waarde (1336 °K). Aangetoond wordt dat hetzelfde geldt voor de discrepantie betreffende het fotometrische stralingsequivalent. Tevens wordt aangetoond hoe het komt dat Van Dusen en Dahl een experimentele waarde van c_2 vonden die overeenstemt met de theoretische waarde.

1935: C. J. Bouwkamp: On integrals occurring in the theory of diffraction of electromagnetic waves by a circular disk (Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam **53**, 654-661, 1950, No. 5; Indagationes Mathematicae **12**, 199-206, 1950, No. 3).

Berekening van integralen die optreden bij de strenge theorie der buiging van een lineair gepolariseerde electromagnetische golf aan een cirkelvormig schijfje of een cirkelvormige opening in een oneindig scherm, als de straal van het schijfje of van de opening klein is vergeleken met de golflengte. Er worden ontwikkelingen gegeven in Legendre-functies, Bessel-functies en hypergeometrische functies.

1936: C. J. Bouwkamp: On the theory of spheroidal wave functions of order zero (Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch. Amsterdam **53**, 931-944, 1950, No. 6; Indagationes Mathematicae **12**, 326-339, 1950, No. 3).

Spheroïdale golffuncties van de orde nul ontstaan bij separatie van de golfvergelijking in omwentelingselliptische coördinaten in het geval van axiaalsymmetrische golfproblemen. De schrijver geeft een overzicht van de bestaande theorie van deze functies. Bovendien is een nieuw volledig systeem van spheroïdale golffuncties aangegeven dat veel voordelen biedt boven de bekende systemen.

1937: W. J. Oosterkamp: Dose measurements on contact therapy tubes (Acta Radiologica **33**, 491-506, 1950, No. 6).

De diverse fouten die kunnen optreden bij de dosimetrie van contacttherapie-buizen worden geanalyseerd en methoden worden beschreven om deze fouten te vermijden. Voor het Philips apparaat werden uitvoerige metingen verricht met betrekking tot: de absorptiekarakteristiek van de straling in aluminium, de halveringsdikte bij diverse filters, de veldverdeling en de verbetering hiervan met een compensatiefilter, de bepaling van diepte-doses en van isodose-krommen in een waterfantoom, de invloed van secundaire straling van de bestralingstubi en de sterkte van de door de patient verstrooide straling met het oog op de bescherming van de röntgenoloog. De metingen werden uitgevoerd met een dynamische electrometer die zeer bruikbaar bleek voor dit soort werk. Ten slotte worden de resultaten vergeleken met die van andere onderzoekers.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!